

Estudio y optimización de la eficiencia de un motor TCG 2032 V16 mediante implementación tecnológica y análisis de datos.

Trabajo de Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Aaron Garcia Piñero

Dirigido por:
Manuel Rodríguez Castillo

Grado en Tecnologías Marinas
Barcelona, Junio de 2020

Departamento de ciencia e ingeniería Náutica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona

Agradecimientos

En este proyecto, la colaboración de distintas personas, técnicos especializados y organismos ha sido la base esencial para desarrollar toda la implementación tecnológica y los estudios técnicos.

Agradecer a los responsables de la cogeneración la gran oportunidad de poder realizar este proyecto y, sin duda, por todos los conocimientos que día tras día se me han transmitido. Se ha creado un óptimo vínculo que ha permitido desempeñar un excelente trabajo en equipo.

Un especial agradecimiento a los mecánicos de la cogeneración por su gran involucración en formarme mecánicamente, con el objetivo de desarrollar todos los trabajos mecánicos del proyecto y de la planta.

Reconocer el buen trabajo del equipo de soldadores y electricistas, aportando toda su experiencia para obtener los mejores resultados.

También gratificar la especial atención y seguimiento de las pruebas por parte de los equipos de PETRONAS LUBRICANTS y LUBRITEC.

Agradecer el interés y la implicación que ha mostrado el tutor a lo largo del proyecto. Del mismo modo, también al equipo de Gestión Académica de la Facultad de Náutica por la ayuda en los tramites pertinentes.

Por último, mostrar una especial gratitud al apoyo imprescindible de familiares y amigos.

Resumen

En el presente proyecto se desarrolla la optimización de un motor de combustión que se ubica en la planta de cogeneración de la empresa CORPORACIÓN ALIMENTARIA DE GUISSONA. Está basado en la búsqueda del aumento de la eficiencia de un motor TCG 2032 V16 MWM.

El proyecto comienza analizando los datos básicos del motor y los aprovechamientos térmicos que genera, necesarios para comprender las implementaciones y las mejoras realizadas.

Después de la parte inicial, se muestra la instalación de toda la monitorización que se le ha incorporado al motor la cual necesaria para poder valorar las pruebas de mejora. Acabada la monitorización se testean distintos elementos recientes en el mercado que, teóricamente, han de suponer un incremento en el rendimiento.

Se expone la prueba de campo que se ha acordado con la colaboración de dos empresas, donde se ha probado un nuevo aceite en el motor para lograr obtener una mejora en el rendimiento del lubricante.

También se hace referencia sobre las regulaciones de las emisiones contaminantes que se aplican a este tipo de motores. La situación actual con el medio ambiente fuerza a las administraciones a ser más estrictas en un futuro inmediato.

Para implementar este proyecto en el motor se ha conseguido un programa de inversión I+D, que ha hecho posible financiar el proyecto.

El trabajo se concluye con la valoración de las pruebas realizadas en el motor y se exponen las líneas de trabajo que quedan abiertas, debido a pruebas que requieren de un cierto periodo de trabajo para obtener resultados reales.

Abstract

The present project is based on the optimisation of a combustion engine located in the cogeneration plant of the company CORPORACIÓN ALIMENTARIA DE GUISSONA. More specifically, the project is aimed at achieving increased efficiency of a TCG 2032 V16 MWM engine.

The project starts by analysing the basic data of the engine and the thermal uses it generates, which is essential to understand the implementations and improvements made.

After the initial part, the installation of all the monitoring that has been incorporated into the engine in order to evaluate the improvement tests is shown. Once the monitoring has been completed, a number of recent elements on the market are tested which are expected to lead to an increase in the performance.

The field test, which has been agreed with the collaboration of two companies, is presented. In the given test, a new oil has been tested in the engine to achieve an improvement in the performance of the lubricant.

The regulations on pollutant emissions that apply to this type of engine are also considered. In effect, the current situation with the environment forces administrations to be stricter in the near future.

In order to implement this project in the engine, an R+D investment program has taken place, which has made it possible to fund the project.

Finally, the tests carried out on the engine are assessed and the lines of work that remain open, due to tests that require a certain period of work to obtain real results.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
TABLA DE CONTENIDOS	vii
TABLA DE ABREVIATURAS	xi
LISTADO DE FIGURAS	xii
LISTADO DE TABLAS	xv
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	1
1.3 ORGANIZACIÓN	2
Capítulo 2. Conceptos generales	3
2.1 CORPORACIÓN ALIMENTARIA DE GUISSONA	3
2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOTOR TCG 2032 V16 MWM	4
2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR	6
2.3 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR EN MODO COGENERACIÓN	8
2.4 REFRIGERACIÓN Y RECUPERACIÓN DEL CALOR ÚTIL DEL MOTOR	9
2.6 ELECCIÓN DEL MOTOR PARA APLICAR EL PROYECTO	10
Capítulo 3. Monitorización del motor	11
3.1 MONITORIZACIÓN DE LOS CONSUMOS DE GAS	11
3.1.1 Situación inicial del contaje de gas	12
3.1.2 Condiciones de referencia del volumen registrado	13
3.1.3 Mejora del sistema de contaje gas	14
3.1.4 Armario de telemedida	15
3.1.5 Instalación del sistema de telemedida	16
3.2 MONITORIZACIÓN DE TORSIÓN Y POTENCIA.	18
3.2.1 Torsión en un eje	19

3.2.2 Sistema TORQUE TRAK REVOLUTION	21
3.2.3 Instalación del torsiómetro.	31
3.3 MONITORIZACIÓN DE LOS FLUIDOS TÉRMICOS.	34
3.3.1 Caudalímetro electromagnético	36
3.3.2 Caudalímetros de vórtice	37
3.4 GASES CALIENTES PROCEDENTES DE LA COMBUSTIÓN	43
3.4.1 Tubo de pitot	44
3.5 MONITORIZACIÓN DEL CONSUMO DE ACEITE	49
3.5.1 Caudalímetro volumétrico PROFLOW	50
3.5.2 Instalación inicial	51
3.5.3 Modificaciones para las pruebas y la instalación del contador	51
3.5.4 Instalación Final	53
Capítulo 4. Eficiencia en la transmisión térmica y calidad de los fluidos caloportadores.	54
4.1 ESPECIFICACIONES DEL REFRIGERANTE	55
4.2 TRANSPORTE DE LA ENERGÍA TÉRMICA	55
4.3 ENSAYO DE LA EFICIENCIA EN LA TRANSMISIÓN TÉRMICA	56
4.3.1 Balance de energías	57
4.3.2 Calculo del ahorro	58
4.4 ESTUDIO DE LA CORROSIÓN	59
4.4.1 Ensayos de corrosión mediante testigos de corrosión	60
4.4.2 Aplicación del ensayo de cupones en el motor	62
4.4.3 Primera parte del ensayo con agua	65
4.4.5 Segunda parte del ensayo con refrigerante	69
Capítulo 5. Análisis de los gases de combustión	70
5.1 GENERALIDADES DE LOS CONTAMINANTES	71
5.2 VALORES BASE DE EMISIONES	72
5.3 NORMATIVA SOBRE EMISIONES CONTAMINANTES	73
5.4 CLAVES PARA LA INTERPRETACIÓN DE LOS ANÁLISIS	75
5.5 APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE HUMOS EN EL MOTOR	76
5.6 ANÁLISIS DE HUMOS	77

5.6.1 Análisis de emisiones antes del mantenimiento	78
5.6.2 Análisis de emisiones después del mantenimiento	79
5.6.3 Análisis de emisiones con bujías de segunda generación	80
5.6.4 Análisis de emisiones finales con los ajustes correctos	81
5.6.5 Análisis de emisiones comparativo con motor G3	83
Capítulo 6. Ensayos con bujías de segunda generación	84
6.1 BUJÍAS DE PRECÁMARA	85
6.2 UPGRADE EN BUJÍAS DE PRECÁMARA	86
6.3 PRUEBAS DE RENDIMIENTO	87
6.3.1 Cálculo del rendimiento eléctrico	88
6.3.2 Prueba de rendimiento inicial	89
6.3.4 Prueba de rendimiento final	90
6.3.5 Estudio económico	92
Capítulo 7. Prueba de campo Petronas GEO NG 40	93
7.1 REQUISITOS GENERALES DE UN ACEITE LUBRICANTE	94
7.1.1 Generalidades	94
7.2 DATOS, ORGANIZACIÓN Y ESTUDIOS PREVIOS	96
7.2.1 Información previa a la prueba	96
7.2.2 Estudio previo del comportamiento del aceite usando el lubricante de SEHLL	97
7.2.3 Descripción y consideraciones iniciales previas a la prueba	103
7.2.4 Seguimiento de la prueba	105
3.2.5 Turbocompresores	108
7.3 INICIO DE LA PRUEBA Y PRIMEROS RESULTADOS	110
Capítulo 8. Programa de inversión I+D	111
8.1 ESTUDIO ECONÓMICO	112
8.2 ESTUDIO DEL AHORRO:	115
Capítulo 9. Monitorización y estudios de las energías del grupo.	116
9.1 CURVAS DE RENDIMIENTO.	116
9.1.1 Estudio del ahorro energético mediante ratios de consumo	118
9.2 BALANCES DE ENERGÍA	119
9.3 PANTALLA SCADA PARA EL MONITOREO	122

9.3.1 KPI'S Energéticos	122
9.4 RESULTADOS DE LA TORSIÓN Y MAGNITUDES EFECTIVAS	124
Capítulo 10. Conclusiones	125
10.1 LÍNEAS DE TRABAJO	126
Bibliografía	127
Webgrafía	128

Listado de abreviaturas

- LAN (*Local Area Network*): Red de Área Local.
- TBN (*Total Basic Number*): Número Básico Total.
- TAN (*Total Acid Number*): Número Total de Ácidos.
- TCP (*Transmission Control Protocol*): Protocolo de Control de Transmisión.
- IBC (*Intermediate Bulk Container*): Recipiente cúbico de 1000L.
- ATEX (*ATmosphère EXplosible*): Atmósferas Explosivas.
- PLC (*Programmable Logic Controller*): Controlador Lógico Programable.
- SAE (*Society of Automotive Engineers*): Sociedad de Ingenieros de Automoción.
- KPI (*Key Performance Indicator*): Indicador Clave de Rendimiento.
- SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*): Supervisión, Control y Adquisición de Datos.
- PCI: Poder Calorífico Inferior.
- PCS: Poder Calorífico Superior.
- UPN: Perfil U Normal.
- S.G (*Strain Gage*): Galga extensométrica

Listado de Figuras

Figura 1. Vista general motor TCG 2032 V16 MWM [2]	4
Figura 2. Disposición de los grupos (Fuente: Propia)	8
Figura 3. Circuitos de refrigeración y aprovechamientos térmicos del motor (Fuente: Propia)	9
Figura 4. Rampa de gas (Fuente: Propia)	12
Figura 5. Sistema de telemetria de gas (Fuente: Propia)	14
Figura 6. Contador de turbina (Fuente: Propia)	16
Figura 7. Conversor electrónico CORUS (Fuente: Propia)	17
Figura 8. Interior armario telemetria (Fuente: Propia)	17
Figura 9. Deformación de la superficie al aplicar par [18]	19
Figura 10. Esfuerzos cortantes en un eje [9]	20
Figura 11. Diseño general del Torsiómetro (Fuente: Propia)	22
Figura 12. Conexiones y controles internos de la unidad de control [5]	25
Figura 13. Representación del funcionamiento de la gala extensométrica [19]	26
Figura 14. Circuito puente de Wheatstone [12]	27
Figura 15. Comportamiento de la gala junto al eje en parado y en marcha [5]	27
Figura 16. Posición de las galgas para captar correctamente las tensiones [11]	28
Figura 17. Conexión del Sensor (Fuente: Propia)	28
Figura 18. Diseño de la ubicación del torsiómetro (Fuente: Propia)	29
Figura 19. Procedimiento para marcar el eje (Fuente: Propia)	31
Figura 20. Pegado de la gala siguiendo las marcas de alineación (Fuente: Propia)	32
Figura 21. Cableado del sensor y fijación de los cables (Fuente: Propia)	32
Figura 22. Montaje final del sistema (Fuente: Propia)	33
Figura 23. Aprovechamientos térmicos del motor (Fuente: Propia)	34
Figura 24. Teoría de funcionamiento del caudalímetro [15]	36
FIGURA 25. Caudalímetro electromagnético [16]	37
Figura 26. Instalación de un caudalímetro [4]	38
Figura 27. Instalación final caudalímetro circuito refrigeración camisas. (Fuente: Propia)	39
Figura 28. Instalación final caudalímetro circuito calefacción. (Fuente: Propia)	39

Figura 29. Instalación caudalímetro circuito intercoolers (Fuente: Propia)	40
Figura 30. Caudalímetro Vórtex circuito aceite (Fuente: Propia)	40
Figura 31. Conexiones caudalímetro electromagnético (Fuente: Propia)	41
Figura 32. Instalación final de los transmisores (Fuente: Propia)	42
Figura 33. Imagen de la salida de humos del motor (Fuente: Propia)	43
Figura 34. Tubo de pitot en el interior de un conducto de gases [10]	44
Figura 35. Tubo de pitot reutilizado (Fuente: Propia)	46
Figura 36. Transmisor de presión DELTABAR PMD235 (Fuente: Propia)	47
Figura 37. Instalación del sistema de medición de caudal (Fuente: Propia)	48
Figura 38. Instalación final del tubo de pitot (Fuente: Propia)	48
Figura 39. Vista general contador PROFLOW [13]	49
Figura 40. Funcionamiento interno contador aceite [13]	50
Figura 41. Filtro aceite (Fuente: Propia)	51
Figura 42. Sistema alimentación aceite (Fuente: Propia)	52
Figura 43. Instalación final del contador de aceite (Fuente Propia)	53
Figura 44. Cupón de cobre y Acero suave (Fuente: Propia)	62
Figura 45. Diseño del porta-cupones de teflón fabricado (Fuente: Propia)	62
Figura 46. Diseño del rack de corrosión fabricado para el circuito de refrigeración del motor (Fuente: Propia)	63
Figura 47. Resultado del diseño del rack de corrosión (Fuente: Propia)	64
Figura 48. Instalación del rack de corrosión (Fuente: Propia)	64
Figura 49. Primer aspecto al retirar los cupones (Fuente: Propia)	65
Figura 50. Vista ampliada del cupón de acero (Fuente: Propia)	65
Figura 51. Medición de los gases de escape (Fuente: Propia)	76
Figura 52. Bujía de precámara (Fuente: Propia)	85
Figura 53. Bujía de electrodo directo [20]	85
Figura 54. Comparativa entre los dos modelos de bujías (Fuente: Propia)	86
Figura 55. Diferencias de funcionamiento entre los dos modelos de bujía (Fuente: Propia)	86
Figura 56. Pantalla de manejo del motor (Fuente: Propia)	87
Figura 57. Pantalla de control del motor (Fuente: Propia)	90
Figura 58. Pantalla de parametrización de las curvas características (Fuente: Propia)	91
Figura 59. Gráfica consumo de aceite (Fuente: Propia)	97
Figura 60. Gráfica histórico aceite en reposiciones (Fuente: Propia)	98

Figura 61. Gráfica evolución del aceite (Fuente: Propia)	99
Figura 62. Gráfica promedio consumo anual (Fuente: Propia)	100
Figura 63. Gráfica relación consumo-potencia motor G4 (Fuente: Propia)	101
Figura 64. Gráfica relación consumo-potencia motor G5 (Fuente: Propia)	101
Figura 65. Gráfica TBN, TAN y Consumo G4 (Fuente: Propia)	102
Figura 66. Gráfica TBN, TAN y Consumo G5 (Fuente: Propia)	102
Figura 67. Muestra ennegrecida del depósito de 20.000L (Fuente: Propia)	104
Figura 68. Secuencia para tomar las muestras de aceite (Fuente: Propia)	105
Figura 69. Sistema de lubricación turbocompresor (Fuente: Propia)	108
Figura 70. Despiece turbocompresor junto con los nuevos recambios (Fuente: Propia)	109
Figura 71. Curva de rendimiento (Fuente: Propia)	117
Figura 72. Gráfica Balance energético (Fuente: Propia)	120
Figura 73. Pantalla SCADA monitorización energías (Fuente: Propia)	123
Figura 74. Curvas de magnitudes efectivas (Fuente: Propia)	124

Listado de Tablas

Tabla 1. Datos Técnicos motor TCG 2032 V16 MWM (Fuente: Propia)	5
Tabla 2. Parámetros de referencia en dos cargas de potencia (Fuente: Propia)	5
Tabla 3. Balance de energías de referencia de diseño del motor (Fuente: Propia)	6
Tabla 4. Datos generadores eléctrico LEROY SOMER (Fuente: Propia)	7
Tabla 5. Descripción parámetros ecuación de gases (Fuente: Propia)	13
Tabla 6. Descripción parámetros ecuación conversión de gas (Fuente: Propia)	13
Tabla 7. Descripción de los parámetros de esfuerzos cortantes (Fuente: Propia)	20
Tabla 8. Descripción parámetros ecuación potencia en eje (Fuente: Propia)	20
Tabla 9. Descripción parámetros ecuación torsión máxima (Fuente: Propia)	24
Tabla 10. Descripción parámetros ecuación RPM FACTOR (Fuente: Propia)	24
Tabla 11. Descripción parámetros ecuación energía térmica (Fuente: Propia)	35
Tabla 12. Cálculos de las medidas necesarias para instalar los contadores (Fuente: Propia)	38
Tabla 13. Configuración señales 4...20 mA (Fuente: Propia)	41
Tabla 14. Valores medios de caudal (Fuente: Propia)	42
Tabla 15. Valores teóricos de gases de escape (Fuente: Propia)	43
Tabla 16. Descripción parámetros ecuación caudal de gases (Fuente: Propia)	45
Tabla 17. Características contador Proflow [13]	50
Tabla 18. Certificado de calibración del fabricante VAF INSTRUMENTS [13]	53
Tabla 19. Conductividad térmica de distintos materiales. (Fuente: Propia)	56
Tabla 20. Propiedades del fluido refrigerante. (Fuente: Propia)	56
Tabla 21. Condiciones iniciales de la prueba con el refrigerante (Fuente: Propia)	57
Tabla 22. Comparativa energética entre los dos medios refrigerantes (Fuente: Propia).	57
Tabla 23. Valores límite del agua de refrigeración (Fuente: Propia)	59
Tabla 24. Parámetros de ecuaciones de pérdida de tarifa de cupones (Fuente: Propia)	61
Tabla 25. Valores del análisis de la corrosión en cobre (Fuente: Propia)	66
Tabla 26. Valores del análisis de la corrosión en cobre (Fuente: Propia)	67
Tabla 27. Resultados cupón cobre (Fuente: Propia)	68
Tabla 28. Resultados cupón acero (Fuente: Propia)	68
Tabla 29. Valores de emisiones de diseño y puesta en marcha (Fuente: Propia)	72

Tabla 30. Valores límite de emisiones (Fuente: Propia)	73
Tabla 31. Valores límite de emisiones [21]	74
Tabla 32. Valores del análisis de emisiones antes del mantenimiento (Fuente: Propia)	78
Tabla 33. Valores del análisis de emisiones después del mantenimiento (Fuente: Propia)	79
Tabla 34. Valores del análisis de emisiones con las nuevas bujías (Fuente: Propia)	80
Tabla 35. Valores del análisis de emisiones con primeros ajustes (Fuente: Propia)	81
Tabla 36. Valores del análisis de emisiones con ajustes finales (Fuente: Propia)	82
Tabla 37. Valores del análisis de emisiones en motor G3 (Fuente: Propia)	83
Tabla 38. Valores extraídos de la web de Enagás con los valores de PCI necesarios	88
Tabla 39. Parámetros de la ecuación rendimiento eléctrico. (Fuente: Propia)	88
Tabla 40. Resultados de la primera prueba de rendimiento (Fuente: Propia)	89
Tabla 41. Resultados de la prueba de rendimiento con bujías mejoradas (Fuente: Propia)	89
Tabla 42. Prueba de rendimiento final (Fuente: Propia)	91
Tabla 43. Análisis de la calidad del gas (Fuente: Propia)	103
Tabla 44. Primeros resultados de consumo de aceite (Fuente: Propia)	110
Tabla 45. Presupuesto de instrumentación (Fuente: Propia)	112
Tabla 46. Presupuesto material y recambios homologados (Fuente: Propia)	112
Tabla 47. Presupuesto trabajos mecánicos (Fuente: Propia)	113
Tabla 48. Presupuesto trabajos eléctricos (Fuente: Propia)	113
Tabla 49. Presupuesto trabajos de programación (Fuente: Propia)	114
Tabla 50. Presupuesto servicio de atención técnica (Fuente: Propia)	114
Tabla 51. Resultados de la inversión I+D (Fuente: Propia)	115
Tabla 52. Cálculo del rendimiento eléctrico para diversos rangos de potencia (Fuente: Propia)	116
Tabla 53. Balance energético real del motor (Fuente: Propia)	119
Tabla 54. Rendimientos de generación (Fuente: Propia)	121

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El progreso en la implementación de monitorización y el análisis de datos son objetivos que la industria debe apostar para alcanzar la eficiencia energética. Será el elemento que les permitirá seguir siendo competitiva en el futuro. La tecnología actual permite recoger y analizar los datos en tiempo real, mediante un buen análisis y una buena gestión de la información la industria será capaz de mejorar sus resultados de eficiencia energética.

La situación actual con el medio ambiente afecta directamente al sector energético que utiliza combustibles contaminantes. La regulación de las emisiones por parte de los gobiernos es cada vez más estricta, tanto en la cantidad de emisiones como en la vigilancia de estas mediante sistemas de televigilancia en continuo.

Con esta visión general del sector energético, se proyecta una optimización energética de un motor MWM TCG 2032 V16 en la planta de cogeneración de la empresa COORPORACIÓN ALIMENTARIA DE GUISSONA.

La planta de cogeneración está ubicada en el complejo industrial "LA CLOSA" (Guissona). La factoría alberga múltiples actividades industriales relacionadas con la elaboración de productos alimentarios. Se requiere de una gran cantidad de energía para llevar a cabo sus actividades y, que además no pueden ser interrumpidas, de esta manera, la planta de cogeneración siempre ha operado centrándose en cumplir sin interrupciones el suministro eléctrico y térmico. Dejando en segundo plano el seguimiento constante por la mejora de la eficiencia de los grupos por medio de nuevas tecnologías.

1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo principal se compone por la monitorización por completo de una unidad de cogeneración para conocer el estado actual del motor y, a partir de allí, poder ir probando distintos elementos mecánicos para encontrar aquellos que, teóricamente, suponen una mejora.

Todos los elementos que se consideran potenciales en obtener una mejora están homologados por la marca MWM (fabricante del motor): bujías de última tecnología, refrigerante de alta eficiencia térmica y un nuevo aceite lubricante.

Por considerarse una instalación en el que un pequeño incremento del rendimiento otorga grandes ahorros y/o beneficios, se ha valorado como muy interesante proceder a comprobar los datos que proponen los fabricantes de los elementos en cuestión.

En la planta de cogeneración se encuentran 5 motores de igual modelo. Para realizar estos ensayos se determina el motor en base a las necesidades de espacio de las pruebas, estado de los motores y, primordialmente, pensando en no interrumpir en el buen funcionamiento de la planta.

1.3 Organización

El desarrollo de este documento empieza con un estudio inicial del motor para comprender su funcionamiento teórico y, los métodos que utiliza la cogeneración para gestionar todas las energías que genera el grupo.

Seguidamente, se describen de forma ordenada en que consiste cada monitorización o implementación, desde la teoría básica necesaria para comprender su funcionamiento hasta como se ha llevado a cabo la instalación de los elementos en el motor.

Una vez realizada la monitorización necesaria, se ha pasado a comprobar todos los nuevos elementos que teóricamente han de suponer una mejora. En esta parte se muestran tablas y gráficas con los resultados obtenidos.

Posteriormente, se presenta el compromiso que se ha realizado con la empresa PETRONAS LUBRICANTS y LUBRITEC para realizar una prueba de campo. Se basa en realizar un ensayo con el aceite PETRONAS GEO NG con el objetivo de conseguir reducir el consumo de aceite, una mejor limpieza interna del motor y duración del aceite.

Para financiar la monitorización y las pruebas, la empresa ha dotado al proyecto de una inversión I+D. En ese punto del documento punto se presentan todos los presupuestos de las implementaciones y el estudio económico del ahorro final.

En el mes de marzo de 2020 el motor de pruebas fue sometido a un mantenimiento del tipo “overhaul” (mantenimiento exhaustivo), donde se realiza una revisión completa del motor (cambio de pistones, camisas, culatas, etc...). Aunque ha ido ligado en algunos momentos con las pruebas del proyecto no se entrará en detalle en cuanto a este mantenimiento.

Capítulo 2. Conceptos generales

2.1 CORPORACIÓN ALIMENTARIA DE GUISSONA

La factoría “LA CLOSA” de CORPORACIÓN ALIMENTARIA DE GUISSONA ubicada en Guissona (Lleida), dispone de un recinto de 220.000m² donde se albergan múltiples actividades industriales.

Se producen una extensa gama de productos alimentarios con la marca BONÀREA. Donde se hacen llegar al consumidor final, de forma rápida y eficiente, así como con la garantía de control de todos los procesos y sin ningún intermediario.

El recinto industrial “LA CLOSA” dispone de:

- Mataderos y despiece de aves, cerdos, y terneros.
- Salas de elaborados (embutidos frescos, cocidos, fileteados, cocinados, etc.)
- Secaderos de jamones con más de 2 millones de unidades en proceso de curación.
- Líneas de lácteos, postres, caldos y cremas, salsas, zumos, etc.
- Gran elaboración de pan.
- Una gran zona logística: almacenes inteligentes y mulles de carga.
- Planta de cogeneración.
- Planta de pet foods
- Depuradora

Es en el mencionado recinto donde se desarrolla el transcurso de este proyecto que ha durado alrededor de un año. Esta presentación de la empresa tiene la intención de mostrar la importancia del departamento de cogeneración de alimentar energéticamente la factoría. Comprendiendo que no es un laboratorio, el asegurar el funcionamiento de la planta y el suministro energético ha prevalecido antes que las pruebas y mejoras que se realizan en este proyecto.

2.2 Especificaciones técnicas del motor TCG 2032 V16 MWM

El motor con el que se desarrolla el proyecto se caracteriza por ser un grupo diseñado para plantas energéticas. Es un motor TCG 2032 V16 del fabricante alemán MWM (anteriormente DEUTZ). Es un motor Otto de gas de cuatro tiempos de alto rendimiento enfriado mediante agua, esto permite un gran aprovechamiento de la energía térmica que se genera en la combustión (enfriamiento de componentes), y de los humos de combustión que se utilizan para la generación de vapor mediante una caldera de recuperación.

Respecto a la protección ecológica, para este motor ha sido desarrollado un método de combustión que permite reducir a un mínimo las emisiones de gases de escape.

La abreviatura **TCG 2032 V16** hace referencia a la denominación del tipo de motor, donde:

- T = Sobrealimentación mediante Turbocompresores.
- C = Mezcla de combustible refrigerada mediante interCoolers.
- G = Motor con Generador eléctrico para producir energía eléctrica
- 2032 = La serie de esta gama de motores.
- V = La posición de los cilindros es en V.
- 16 = número de cilindros (ocho a cada lado).



Figura 1. Vista general motor TCG 2032 V16 MWM [2]

A continuación, se muestra en la tabla 1 los datos técnicos más relevantes del motor:

Tipo motor	TCG 2032 V16 (MWM)
Número de cilindros	16 en V
Desplazamiento	271.8 dm ³
Relación de compresión	12:1
Velocidad lineal pistón	10,7 m/s
Contenido de aceite	2000 dm ³
Consumo de aceite mineral a carga máxima	0,4 g/kWh \pm 20%
Caudal aceite	125 m ³ /h
Temperatura aceite entrada/salida	74.0°C / 80,9°C
Capacidad refrigerante (agua)	570 dm ³
Temperatura agua camisas in/out	82°C/92°C
Combustible	Gas natural
Velocidad	1000 rpm
Encendido motor	Aire Comprimido
Sistema operativo de gobierno	TEM EVO

Tabla 1. Datos Técnicos motor TCG 2032 V16 MWM (Fuente: Propia)

En la tabla 2 se encuentran unos valores de referencia para distintos parámetros relevantes en dos rangos de potencias. Se considera importante tener unos valores de referencia para poder partir con una base en el momento de desarrollar las implementaciones.

Régimen de carga	100%	50%
Potencia mecánica motor	3800 kW	1900 kW
Presión efectiva C.C.	16,8 bar	8.4 bar
Temperatura gases escape	476°C	511°C
Caudal de gases de escape	18602 kg/h	9783 kg/h

Tabla 2. Parámetros de referencia en dos cargas de potencia (Fuente: Propia)

Probablemente, la tabla 3 es una de las más importantes, el balance de energías que se muestra se utilizará en el desarrollo de los próximos capítulos para corroborar y verificar que las monitorizaciones de las energías se realizan correctamente. Finalmente, servirá para verificar si se ha mejorado en referencia a esta tabla que corresponde al balance de energías de diseño del fabricante.

Balance de energías del motor	100%	50%
Potencia eléctrica	3700 kW	1830 kW
Calor agua de camisas	1265 kW	586 kW
Calor agua intercoolers	303 kW	157 kW
Calor gases de escape	2122 kW	1235 kW
Calor aceite	450 kW	319 kW
Consumo de combustible	8792 kW	4741 kW
Rendimiento eléctrico	42,2 %	38,6 %
Rendimiento Térmico	43,6 %	45,1 %

Tabla 3. Balance de energías de referencia de diseño del motor (Fuente: Propia)

2.2 Principio de funcionamiento del motor

Es un motor de combustión de gas natural con ignición mediante bujías que opera según el principio de funcionamiento del ciclo Otto. Trabaja con el ciclo operativo de 4 tiempos: Admisión, compresión, expansión y escape. La combustión del gas es a volumen constante, explosión instantánea.

El sistema de alimentación es sobrealimentado, donde dos turbocompresores utilizan la energía de los gases de escape para aspirar aire y gas por medio de un mezclador. En los intercoolers se refrigera la mezcla para aumentar la densidad del gas y por tanto introducir más mezcla en los cilindros (incremento de potencia en el mismo volumen de cilindro). La mezcla se introduce en el colector general y se distribuye a cada uno de los cilindros.

El motor realiza una mezcla pobre en gas. Esto se refiere a un exceso de aire en la mezcla, que obtiene como resultado una disminución de la temperatura de los gases de combustión y de las emisiones de NOx. Es la relación entre aire y combustible ideal para que la combustión se realice del modo más eficiente posible.

En la etapa de admisión, momento cuando baja el pistón y se abren las válvulas de admisión se introduce la mezcla que seguidamente el pistón comprime. Es entonces cuando el sistema electrónico de distribución de chispa entrega corriente a la bujía para provocar la combustión de la mezcla comprimida.

El motor está equipado con un sistema de encendido que por medio de la lectura de la posición angular del cigüeñal determina exactamente el momento de encendido. Es posible ajustar el ángulo de encendido que se considere oportuno. Por otro lado, también se pueden ajustar las temperaturas de las cámaras de combustión, el motor realizará la mezcla más rica o pobre dependiendo de la temperatura configurada. Estos dos ajustes permiten ajustar el motor para obtener el máximo rendimiento de la combustión y/o reducir al máximo las emisiones contaminantes.

Este grupo es gobernado por el sistema de control TEM-EVO que se usa para motores de gas de la marca MWM. Este sistema ha sido diseñado por el fabricante AVAT, expertos en el control de combustión de motores grandes de gas para la generación de energía. Permanentemente controla todos los parámetros importantes del motor y el generador.

A lo largo del proyecto se nombrará la palabra TEM para referirse al sistema de control del motor.

En la misma bancada se encuentran el motor de explosión y el alternador. Mediante un acoplamiento de tipo elástico el eje del motor está acoplado a un alternador.

El generador es de la marca LEROY SOMER, en la tabla 4 se encuentran las principales características.

GENERADOR LEROY SOMER	
Modelo del generador	LS LSA 56 B-L7 / 6p
Peso del alternador	11.900 kg
Potencia Nominal	3440/4300 kVA
Tensión Nominal	6000 V
Frecuencia	50 Hz
Eficiencia del generador	97,4%
Temperatura máxima de trabajo	40 °C

Tabla 4. Datos generador eléctrico LEROY SOMER (Fuente: Propia)

2.3 Descripción del funcionamiento del motor en modo cogeneración

La planta de cogeneración donde se encuentra el motor del proyecto se compone por una sala principal con 5 motores de gas en línea, tal como se muestra en la figura 2. Su funcionamiento depende de la demanda eléctrica/térmica de la fábrica.

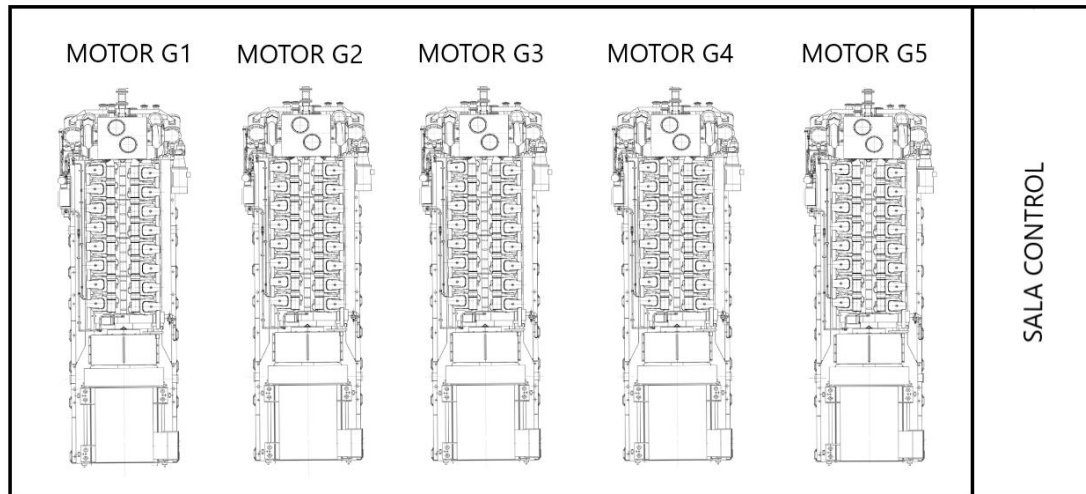


Figura 2. Disposición de los grupos (Fuente: Propia)

El consumo máximo del recinto oscila entre 17.000 kW y 20.000 kW. Dependiendo de la actividad industrial del momento y la estación del año.

La planta es suficientemente capaz de subministrar la energía necesaria para la producción y, además de exportar a la línea general. La exportación eléctrica se programa en referencia al precio del kWh del día. Habitualmente se exporta aproximadamente de 8 am hasta las 24 pm.

Los grupos trabajan los cinco días laborables de 7 am hasta las 24 pm. Durante cada jornada la potencia de los motores la regula un PLC en función de la potencia consumida por fábrica y la exportación a la red programada. Una vez se arrancan y se verifica el normal funcionamiento por el operador de la planta se ponen en modo automático. El PLC constantemente calcula y regula la potencia de los motores para ajustarla a la potencia requerida.

El aprovechamiento de la energía que genera el motor en forma de calor útil es el fundamento de la cogeneración. Cada empresa adapta la planta generadora a sus necesidades energéticas, por ello, existen varias configuraciones para aprovechar el calor que genera el motor.

Concretamente, se aprovechan los gases de escape que genera la combustión para la producción de vapor, el agua de alta temperatura que refrigera los componentes del motor (camisas, culatas, etc...), calor del aceite lubricante y, el último aprovechamiento se compone por el circuito de agua de baja temperatura (refrigera la mezcla aire-gas). Se pierde entre un 4-5% de calor por radiación térmica del propio motor. El rendimiento térmico oscila entre el 43%.

2.4 Refrigeración y recuperación del calor útil del motor

Las recuperaciones de calor configuradas para los motores de esta planta son las siguientes:

- 1) Los gases a 500°C producidos en la combustión son recogidos por un colector que conduce dichos humos hasta una caldera de recuperación. La caldera produce vapor para las secciones de la fábrica que requieran de este servicio. Puede apreciarse en la figura 3 como el conducto gris.
- 2) El circuito rojo de la figura 3 se denomina "Circuito de Calefacción". Es agua de alta temperatura que refrigera los componentes del motor y el aceite lubricante. Este circuito primero mediante un intercambiador de placas refrigera el aceite (circuito marrón de la figura 3) y, posteriormente, también mediante un intercambiador refrigera el circuito cerrado de agua de refrigeración de componentes (circuito amarillo).

El circuito de calefacción entra a 65°C, después de refrigerar el aceite y el agua de las camisas, sale a 85°C. A partir de aquí, el calor se conduce hacia los usuarios de fábrica.

Algunos de estos usuarios son: mataderos, elaborados cárnicos, máquinas de absorción, líneas de lácteos, etc...

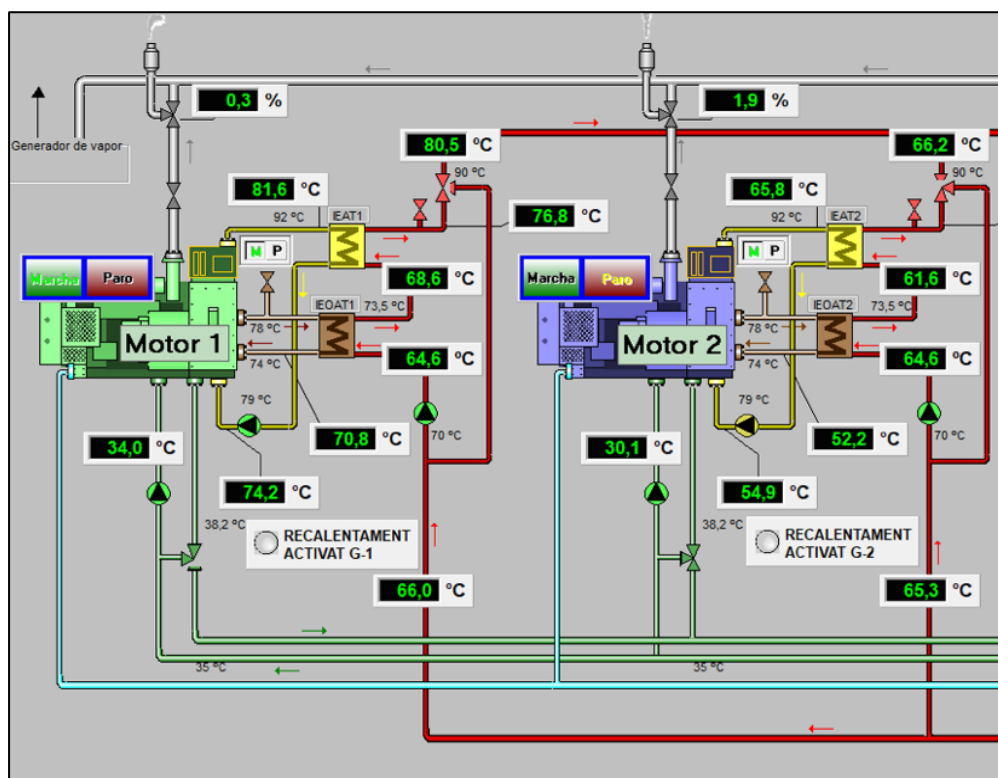


Figura 3. Circuitos de refrigeración y aprovechamientos térmicos del motor (Fuente: Propia)

- 3) El último aprovechamiento de calor es el circuito de agua de baja temperatura. Se compone por el circuito que refrigera la mezcla aire-gas que comprimen los turbocompresores. Este circuito se puede apreciar en la figura 2 como el conducto verde. El agua entra en los intercoolers a 35°C y sale a 40 °C. El calor generado se aprovecha para la calefacción de fábrica y oficinas mediante suelo radiante.

Cuando los consumos térmicos de fábrica bajan, el agua que retorna al motor no está suficientemente fría para el buen funcionamiento del motor, entonces entran en juego la torre de refrigeración y los aéreo-refrigeradores.

En el circuito de agua a alta temperatura está instalado un sistema de aéreo-refrigeradores. Se compone por un serpentín por donde circula el agua y, por medio de ventiladores industriales se enfría por convección con el aire. Este sistema está automatizado para que se arranque cuando la temperatura de entrada a motor es más alta que la programada.

En el circuito de baja temperatura está instalada una torre de refrigeración. Cuando la temperatura de entrada supera la temperatura de consigna entra en marcha la torre.

2.6 Elección del motor para aplicar el proyecto

Para la elección del motor se ha tenido en cuenta las necesidades de los ensayos y el estado de los motores.

Se ha seleccionado el motor G5 por los siguientes motivos:

- Motor con el consumo de aceite más elevado.
- Motor ubicado más próximo a la sala de control.
- Conociendo que se iba a realizar el mantenimiento overhaul que conlleva 3 semanas de paro, permitía realizar las implementaciones y mejoras de este proyecto.
- El PLC donde se han cableado todas las señales de las implementaciones queda más cerca del motor G5.

Capítulo 3. Monitorización del motor

3.1 Monitorización de los consumos de gas

La monitorización del consumo de gas en tiempo real se presenta como un paso clave para desarrollar el proyecto. Se valora que la precisión de estos datos es necesaria para evaluar la idoneidad de los nuevos elementos a ensayar.

Aunque no proporciona una mejora directa en el funcionamiento del motor, es la herramienta que permitirá poder calcular el rendimiento del grupo en los próximos apartados.

Con el propósito de obtener unos resultados verídicos con los cuales extraer unas conclusiones, se debe tener un contaje de consumo de gas con una exactitud elevada. Esto mejorará los cálculos y otorgará veracidad a las pruebas.

Este punto del proyecto se fusiona con otra inversión I+D de la cogeneración. La tarea es la misma, pero a mayor escala. Esta otra inversión se basa también en la monitorización de consumo de gas, pero, de los 5 motores, con esto monitorizar el rendimiento de cada grupo y mejorar la facturación del gas para cada uno.

Se remarca que la capacidad de monitorizar el rendimiento eléctrico con valores exactos facilitará el diagnóstico del motor, llegando al nivel de poder percibir mejoras en ajustes susceptibles de influir directamente en el rendimiento.

Con esta virtud se considera interesante poder detectar en el rendimiento cualquier tipo de anomalía que se pueda rectificar y, por ende, mantener la eficacia de los motores en niveles óptimos.

Un ejemplo, el ajuste de las temperaturas de cámaras de combustión y ángulo de encendido que, evitan el desvío de rendimiento que padecen en los cambios de clima. Para poder detectar cambios y conocer lo que suponen estos ajustes es necesario de un sistema de medida con una precisión como la que se expone.

Se considera que los cambios climáticos entre otros parámetros pueden afectar al motor haciendo reducir hasta un 0,2% su rendimiento. Con esta implementación se podrá vigilar que el motor se mantenga en niveles de rendimiento óptimos, además de poder actuar en el momento más oportuno para corregir estos posibles fenómenos.

3.1.1 Situación inicial del contaje de gas

El motor dispone de una rampa de gas que regula la presión de gas a la requerida por el motor. Aguas arriba de la regulación se encuentra instalado un contador de tipo turbina del modelo ELSTER TRZ2 DN80 G-250. En la figura 4 se presenta la rampa donde el gas fluye de derecha a izquierda.



Figura 4. Rampa de gas (Fuente: Propia)

El funcionamiento del contador se basa en la rotación de la turbina provocado por la circulación en continuo del gas. Este modelo cuenta con un difusor integrado que rectifica el flujo del gas y lo acelera para mejorar la medición.

Las revoluciones de la turbina son proporcionales al caudal que fluye por el interior del contador. Mediante un sistema de relojería de engranajes reductores se traducen las revoluciones de la turbina a una medida de gas que se refleja en un totalizador de 8 dígitos.

También dispone de un emisor de pulsos eléctricos de baja frecuencia (son generados por un contactor Reed). Estos se usan para transmitir hasta un PLC el volumen de gas.

Este sistema de contaje mide el volumen de gas en metros cúbicos (m³), es una medición de volumen bruto. Conociendo que el volumen de un gas depende de la presión y la temperatura, el volumen se debe expresar referido a unas condiciones determinadas de temperatura y presión.

La monitorización del consumo de gas se basa en la instalación de un conversor electrónico de gas. Este sistema permitirá obtener unas mediciones corregidas de volumen de gas y el caudal de gas de forma instantánea (Nm³/h). En la situación inicial solo se tenía un volumen acumulado.

3.1.2 Condiciones de referencia del volumen registrado

Las condiciones de medida normales en España son con referencia a una temperatura de 0°C y a 1 atmósfera de presión.

Existen múltiples formas que permiten calcular la equivalencia del volumen de gas a las condiciones de medida predeterminadas. La ecuación más universal es la siguiente:

$$P \cdot V = n \cdot z \cdot RT \quad [1]$$

P [Pa]	Presión absoluta de gas.
V [m3]	Volumen del gas.
N [mol]	Cantidad de materia.
z	Factor de compresibilidad del gas
R [8.3145 m3 Pa/ (mol k)]	Constante universal de los gases
T [k]	Temperatura absoluta del gas en k

Tabla 5. Descripción parámetros ecuación de gases (Fuente: Propia)

Sin embargo, en la práctica los conversores de gas utilizan la siguiente ecuación para corregir el volumen a condiciones de referencia.

$$V_c = \frac{P}{P_r} \cdot \frac{T_r}{T} \cdot \frac{Z_r}{Z} \cdot V_b \quad [2]$$

Vc [m3]	Volumen convertido a condiciones de referencia
Vb [m3]	Volumen medido por el contador.
P [bar]	Presión del gas medido.
Pr [1.01325 bar]	Presión del gas de referencia
T [K]	Temperatura del gas medido.
Tr [273,15 K]	Temperatura absoluta del gas en k
Zr	Factor de compresibilidad en condiciones de trabajo
Z	Factor de compresibilidad en condiciones de referencia

Tabla 6. Descripción parámetros ecuación conversión de gas (Fuente: Propia)

El cálculo del volumen de gas a condiciones normales requiere la lectura de la presión P y la de la temperatura T. Visto esto y conociendo la situación inicial se tiene que instalar estas dos sondas.

El conversor electrónico de volumen de gas elegido es un CORUS del fabricante ITRON. Mediante este instrumento se obtiene el volumen de gas a condiciones de referencia (Volumen corregido). Por otro lado, este sistema proporciona la comunicación de los siguientes datos:

- En la figura 5, se muestra un resumen de la instalación para conseguir la monitorización del consumo de gas en tiempo real. Se basa en redirigir los pulsos que nos proporciona el contador de gas hacia el conversor, donde con la instalación de una sonda de temperatura y presión se realiza la conversión a condiciones normales. Mediante protocolo de comunicación RS-485 se realiza la lectura del conversor a través del modem que, conectado a ethernet el PLC podrá comunicarse con este sistema.



3.1.4 Armario de telemedida

El Armario de telemedida es el sistema que permite poder acceder a los conversores de gas de forma remota y realizar las lecturas necesarias. El armario ha sido pre-montado en la empresa APLICAGAS con las indicaciones del fabricante ITRON. Seguidamente se introducen los elementos principales que lo componen.

3.1.4.1 ISB+

Es un módulo electrónico que garantiza el aislamiento galvánico para puertos RS485 para zonas ATEX (*ATmospherères EXplosives*). El PLC no puede ser conectado directamente al puerto serie del conversor, por ello se instala el ISB+ que permite la conexión al puerto serie del conversor.

Se utiliza para conectar un modem y realizar las lecturas remotamente de los conversores.

Requiere de una fuente de alimentación externa de 24VDC. Se puede utilizar de fuente de alimentación para dar tensión al CORUS. En este caso no se requiere, ya que el conversor dispone de batería propia (5 años de duración).

3.1.4.2 Modem

Es un modem de comunicación de seguridad para zonas ATEX. Permite comunicarse con el conversor de gas de una manera remota mediante la interfaz RS485. Este dispositivo realiza las lecturas de los datos del corrector.

Está conectado a la LAN (*Local Area Network*) mediante Ethernet.

3.1.4.3 Fuentes de alimentación

El armario contiene dos fuentes de alimentación con una tensión de entrada de 220VAC y 24VDC de salida. Estas también tienen el aprobado ATEX.

3.1.4.4 Comunicación

Tanto el modem como el PLC están conectados al HUB (concentrador de puertos de ethernet), estando así ambos en la LAN interna de la empresa. De esta manera, mediante Ethernet el PLC realiza una serie de consultas (se programan las consultas de datos que se requieren) al modem. Seguidamente, el modem recoge los datos (del conversor) de las consultas que le ha realizado el PLC y se las comunica.

Los datos registrados en el PLC se muestran por el SCADA y se realizan cálculos con ellos.

El Modbus RS-485 TCP es un protocolo de comunicación basado en el sistema cliente/servidor.

3.1.5 Instalación del sistema de telemedida

Las tareas para llevar a cabo la instalación son las siguientes:

- Instalación en superficie del conversor CORUS. Se instala en un lugar accesible para el manejo y, ajuste de parámetros.
- Instalación del transmisor de presión.
- Instalación de la sonda de temperatura.
- Extensión de cables del transmisor de presión, sonda de temperatura y emisor de pulsos del contador hacia el corrector CORUS.
- Comunicación entre el conversor y el armario de telemedida (RS485).
- Acometida eléctrica.
- Comunicación al PLC.

En primer lugar, se realizan los trabajos en la rampa de gas y, para ello, es necesario cerrar la rampa de gas mediante la válvula de mariposa de la entrada. Satisfactoriamente, el contador y la rampa contienen orificios preparados para realizar estas mejoras y no se ha tenido que perforar nada. El contador de turbina dispone de un orificio para el registro de presión y en la rampa se encuentra un picaje donde se ha instalado la sonda de temperatura.

Para la instalación de la sonda de temperatura se ha montado primeramente un termopozo, además se ha añadido pasta conductora térmica al termopar para obtener una precisa lectura de la temperatura.

Por otro lado, se ha descableado la señal de pulsos que comunicaba el contador con el PLC (contaje en bruto). En la imagen 6, se aprecia el relé Reed con el nuevo cableado hacia el conversor.

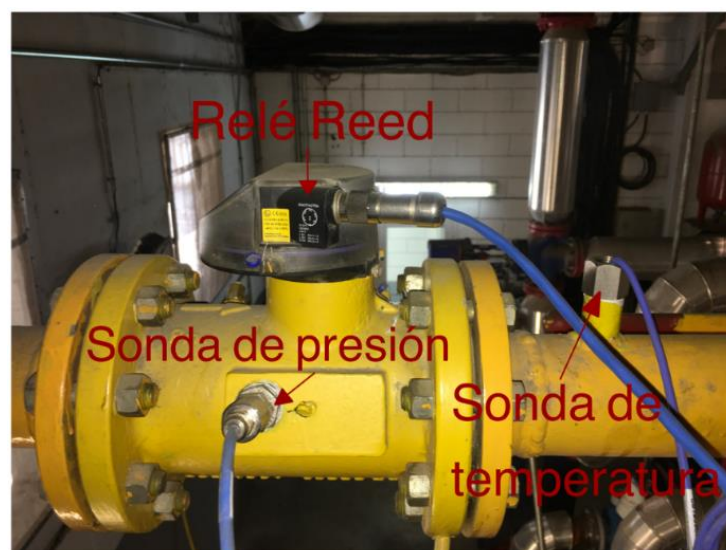


Figura 6. Contador de turbina (Fuente: Propia)

En la figura 7 se observa el conversor instalado en la pared y también cableado.



Figura 7. Conversor electrónico CORUS (Fuente: Propia)

Para terminar, se muestra en la figura 8 el interior del armario de telemedida. Ordenadamente, el cuadro es alimentado por 220VAC en el enchufe del centro inferior. La tensión de 220VAC llega a las fuentes de alimentación pasando por un interruptor magnetotérmico (protección cuadro) que, alimentan con 24VDC al ISB+ montado a la izquierda del armario y el modem de la derecha.

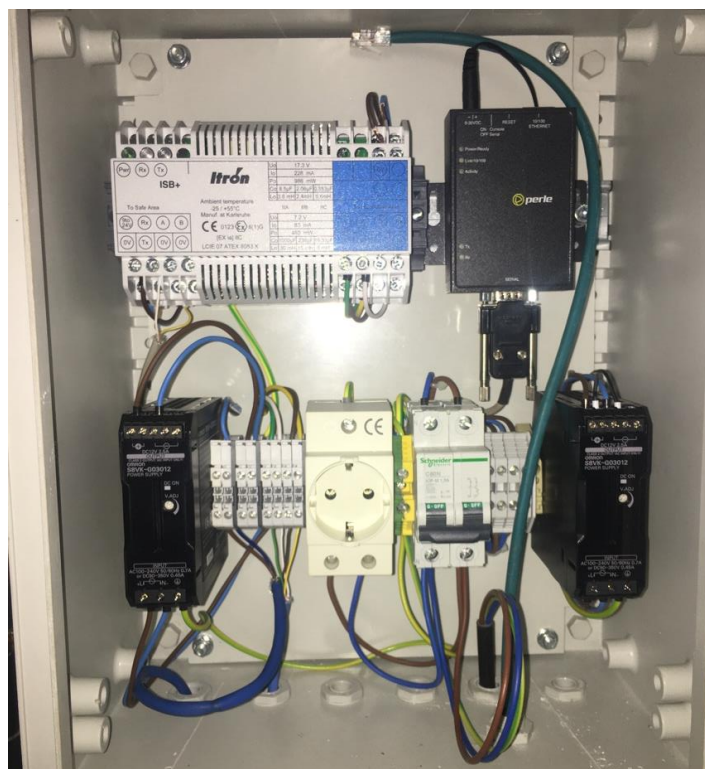


Figura 8. Interior armario telemedida (Fuente: Propia)

3.2 Monitorización de torsión y potencia.

Este apartado se centra en mejorar la obtención de datos relevantes como la torsión del eje del motor y la potencia mecánica. De este modo, poder ascender a un nivel más alto los cálculos de eficiencia y estudiar cómo se comporta el rendimiento.

Se ha conseguido obtener el rendimiento mecánico del motor y el rendimiento del alternador. También se ha podido valorar la efectividad de los dos sistemas por separado.

La eficiencia del motor era calculada a partir de la energía eléctrica generada y el consumo de gas del motor, obviando así, el rendimiento mecánico del motor y la eficacia del alternador. Para poder discriminar estos rendimientos por separado ha sido necesario realizar el cálculo de la potencia en el eje mediante la obtención de la torsión en el mismo.

Para lograr obtener esta información se ha instalado un torsiómetro en el eje del motor. El cual proporciona estos valores de forma instantánea.

Se consigue el rendimiento mecánico del motor y el rendimiento del alternador. De este modo poder valorar la efectividad de los dos sistemas por separado.

Con el conocimiento de estos valores se pueden tomar medidas para actuar con más precisión ante una bajada de rendimiento o cualquier tipo de anomalía. Dicho sistema nos proporciona poder realizar el cálculo de potencia efectiva en el eje que, con la potencia consumida del motor se obtiene el rendimiento mecánico. Por otro lado, con la potencia en el eje y la potencia eléctrica, se obtiene el rendimiento del alternador.

El cálculo de la potencia óptima a la cual el motor obtiene mejores rendimientos es otra de las aplicaciones que se realizará en el estudio.

3.2.1 Torsión en un eje

A través de la medición de la torsión en el eje será posible el cálculo de la potencia transmitida por el motor.

Técnicamente se denomina **potencia efectiva** del motor y se obtiene a partir de sistemas de medición como torsiómetros o frenos.

Primeramente, se considera relevante comprender como se comporta la torsión en el eje, para posteriormente estudiar la instalación de la instrumentación que la medición de torque requiere.

Se analiza la torsión de un eje principal que recibe la potencia de un motor de combustión como máquina motriz y la transmite a un alternador como máquina conducida. La transmisión de dicha potencia desde un motor implica un par que genera una torsión a lo largo del eje.

Para entender mejor el fenómeno físico de torsión, si dicho eje se dividiera en múltiples discos, cada unidad que conforma el eje giraría con respecto a la anterior. Entonces el eje se tuerce, pero no se deforma (mantiene el diámetro y la longitud).

Aunque no se deforma el eje, el giro de cada disco respecto al anterior crea un desplazamiento en la superficie externa. Este desplazamiento crea una deformación en el área externa, pero no en las dimensiones del eje. Si se dibujara una cuadrícula sobre el eje, al aplicar par sobre él los cuadrados pasarían a ser rombos.

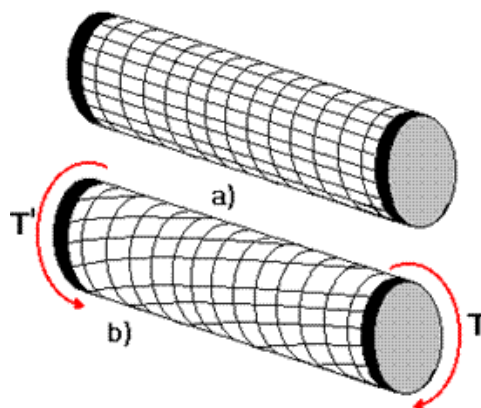


Figura 9. Deformación de la superficie al aplicar par [18]

Cada sección transversal del eje está sometida a un esfuerzo cortante (τ). El esfuerzo varía linealmente en el largo de cada línea radial de la sección transversal, obteniendo el máximo esfuerzo cortante en la superficie externa el eje. De esta manera, se puede afirmar que la torsión en el eje es constante en toda su longitud. El instrumento de medición de torsión se puede instalar en cualquier punto del eje.

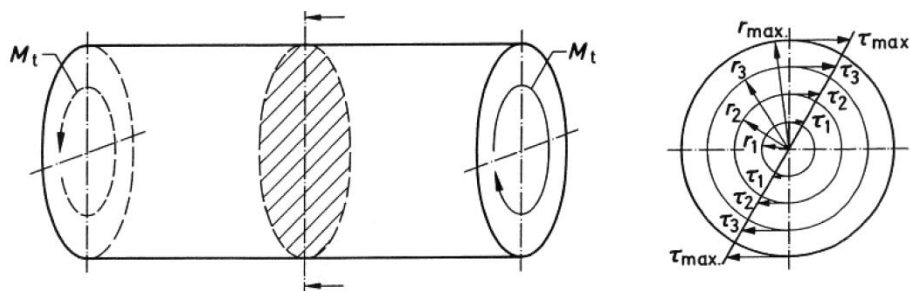


Figura 10. Esfuerzos cortantes en un eje [9]

M_t	Momento de torsión
τ	Esfuerzo cortante
r_{max}	Posición máximo esfuerzo

Tabla 7. Descripción de los parámetros de esfuerzos cortantes (Fuente: Propia)

El instrumento de medición de torque se denomina torsiómetro. Unido al eje a analizar, su principal propósito es la medición de la torsión. Aunque permanece unido no absorbe potencia ejercida por el motor, sino que analiza el efecto provocado por el giro del eje que transmite dicha potencia. Existen distintos torsiómetros que utilizan diferentes tecnologías de medición para obtener la torsión. Conociendo tal valor y las revoluciones, es posible determinar la potencia efectiva en el eje.

$$P = T \cdot 2\pi f \quad [3]$$

P	Potencia efectiva
T	Torque
f	frecuencia de giro

Tabla 8. Descripción parámetros ecuación potencia en eje (Fuente: Propia)

3.2.2 Sistema TORQUE TRAK REVOLUTION

Durante el previo estudio se han barajado distintos tipos de torsiómetros de diferentes fabricantes. La mayoría de los torsiómetros son diseñados para el sector marino y son de proporciones elevadas. Debido a esto no encajaban en las medidas de la zona libre del eje del motor.

Después de estudiar la instalación con torsiómetros ópticos, piezoeléctricos y mediante bandas extensométricas con los distintos fabricantes, se descartó el óptico debido a sus grandes dimensiones y, por otro lado, también el piezoeléctrico, ya que el fabricante no aseguraba una gran precisión debido a la elevada velocidad de giro.

Finalmente, la opción elegida ha sido un torsiómetro que utiliza la tecnología de bandas extensométricas. El reducido grosor del instrumento y su precisión de medición han sido los factores que han determinado la elección.

El torsiómetro que se ha comprado procede de Michigan (USA), del fabricante BINSFELD ENGINEERING INC. El modelo elegido tiene el nombre de TORQUETRAK REVOLUTION SYSTEM.

3.2.2.1 SISTEMA TORQUETRAK

El sistema consiste en un instrumento de medición en continuo de potencia y torsión. Principalmente se compone por un anillo estacionario y otro rotatorio. Mientras uno gira solidario al eje, el anillo estacionario permanece sin ningún movimiento alrededor del rotatorio.

Integra un sistema de transmisión de potencia inductiva diseñado para monitorear en continuo el torque, potencia, velocidad (rpm), y la dirección de rotación. Toda la información se transfiere desde el anillo dinámico hacia el estático, conectado este último a la unidad de control. La instalación del dispositivo no requiere de modificación alguna del eje ni tener que desacoplar ninguna parte del motor.

El montaje del instrumento no necesita de un técnico especializado en el campo. Un técnico con conocimientos básicos ha de ser capaz de instalarlo con la ayuda del manual de instalación y de calibración.

3.2.2.2 Componentes del sistema TORQUE TRAK

Anillo dinámico (rotatorio): se compone por dos piezas semicirculares fijadas en el eje del motor mediante dos pernos. Alberga un módulo transmisor que convierte la señal de la galga extensométrica en una señal digital. Dispone de 6 imanes repartidos uniformemente en el perímetro del anillo para monitorizar la velocidad (el sensor de velocidad detecta cuando pasa un imán cerca, consecutivamente envía un tren de impulsos eléctricos).

Anillo estático: también nombrado anillo de potencia se encarga de transmitir energía hacia el collar rotatorio y recibir la señal de este para así transmitirla a la unidad de control.

Galga extensométrica: Adherida al eje mediante pegamento, transforma la torsión mecánica del eje en una señal eléctrica.

Unidad de control: Proporciona energía al anillo estático y procesa cuatro señales simultáneas de información: torsión, velocidad, potencia y sentido de giro. Contiene un centro de indicación de posibles errores.

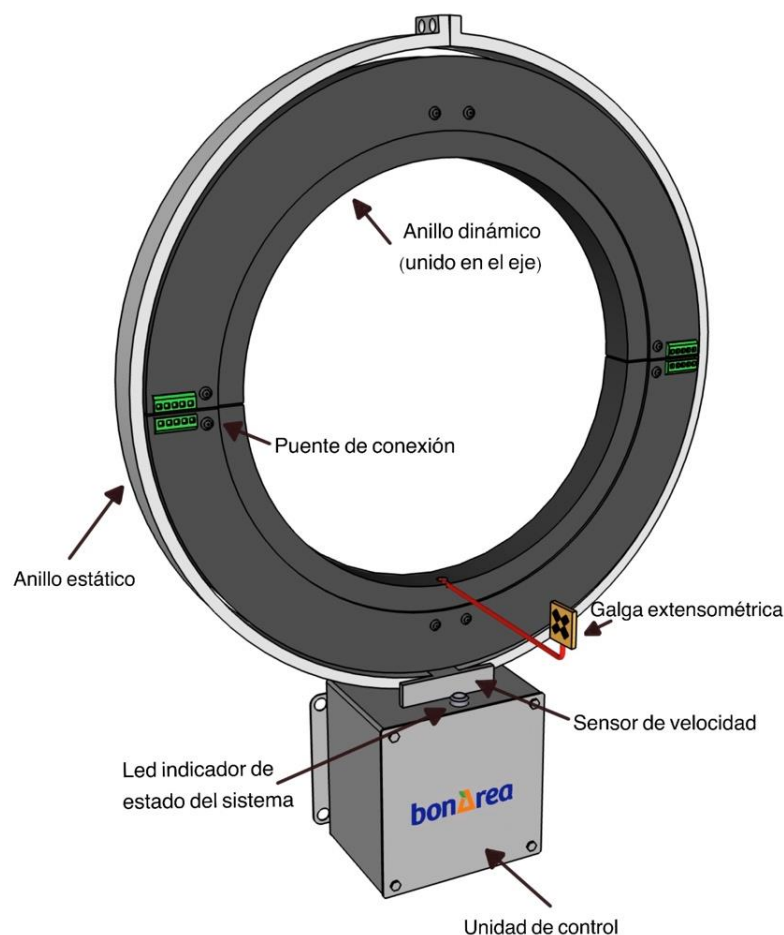


Figura 11. Diseño general del Torsiómetro (Fuente: Propia)

3.2.2.3 Transferencia de potencia y datos:

La potencia y los datos son transferidos inductivamente entre el collar estacionario y el rotatorio. La transferencia inductiva se caracteriza por no tener ningún tipo de contacto entre las caras de los anillos. El espacio nominal en la cámara de aire entre estos dos collares es de 0,5cm, por tanto, la potencia y la transferencia de datos tiene lugar a lo largo del collar.

La frecuencia del acoplamiento del sistema TORQUETRAK es de 460.800Hz, llamada frecuencia de potencia. La frecuencia de potencia es transferida desde el anillo de potencia estacionario hacia el anillo dinámico.

Se envía una corriente alterna a través de la bobina estacionaria (Anillo de potencia). Esto induce una corriente en la bobina giratoria a través de la inductancia mutua. La corriente alterna en el lado rotativo se rectifica y se filtra para energizar el circuito transmisor giratorio más el medidor de tensión (banda extensiométrica), que está unido al eje.

3.2.2.4 Señales de salida

El sistema nos genera señales 4...20mA (lazos de corriente), el valor físico medido por el torsiómetro se convierte en una señal eléctrica cuyo valor será proporcional a la medición. Entendiendo que el valor de 4mA representará el valor mínimo de medición y los 20mA el valor máximo. En la figura 4 se muestran los terminales de las diferentes señales de salida (Signal output terminal).

Estas señales han sido cableadas hacia un PLC (Programmable Logic Controller) donde son registradas en la base de datos y utilizadas para realizar los estudios y cálculos que en los siguientes apartados se mostrarán.

Para preservar la precisión se han cableado las señales con un cable especial para instrumentación. Se compone por un conjunto de 6 cables en 1, apantallado cada 2 cables. Es decir, en una sola manguera de cable se encuentran los cables envueltos de dos en dos por una malla metálica que elimina las posibles interferencias de ruidos eléctricos.

3.2.2.5 Cálculo de los parámetros de configuración

La unidad de control recibe la señal de torsión mediante la galga y por otra parte la velocidad con el sensor de rpm. Junto con esto dos valores la unidad requiere de los parámetros característicos del motor para poder calcular y generar correctamente las distintas señales de salida.

Primeramente, se realiza el cálculo de torsión máxima para obtener el rango de torsión en el cual opera el motor.

$$T_{\text{máx}} = \frac{D_o^3}{GF \cdot 32,02} \quad [4]$$

Conociendo: $D_o = 204 \text{ mm}$; $GF = 2,08$

$$T_{\text{máx}} = 127.469,37 \text{ Nm}$$

Donde:

$T_{\text{máx}}$	Torsión máxima (Nm)
D_o	diámetro exterior del eje
GF	Factor de la galga (fabricante)
32,02	Constante por el fabricante

Tabla 9. Descripción parámetros ecuación torsión máxima (Fuente: Propia)

Consecutivamente siguiendo el manual del fabricante se calcula una constante denominada "RPM FACTOR". Este valor se introduce dentro de la unidad de control mediante una serie de selectores, en la figura 4 se pueden apreciar los selectores "power scaling". La ecuación es la siguiente:

$$\text{RPM FACTOR} = \frac{P_{\text{máx. mec.}} \cdot \text{Constante}}{T_{\text{máx}}} \quad [5]$$

Conociendo: $P_{\text{máx. mec.}} = 3820 \text{ kWmec.}$; $\text{Constante} = 9550$; $T_{\text{máx}} = 127.469,3 \text{ Nm}$

$$\text{RPM FACTOR} = 284,69$$

Donde:

$T_{\text{máx}}$	Torsión máxima (Nm)
RPM FACTOR	Parámetro de configuración
Constante	9550 (mediante fabricante)
$P_{\text{máx. mec.}}$	Potencia mecánica máxima (banco de pruebas)

Tabla 10. Descripción parámetros ecuación RPM FACTOR (Fuente: Propia)

La configuración final del torsiómetro queda de la siguiente manera:

- Rango de la señal de salida de torsión del eje:
 - 4 mA = 0 Nm
 - 20 mA = 127.469,3701 Nm
- Rango de la señal de salida de potencia mecánica:
 - 4 mA = 0 kWmec.
 - 20 mA = 3820 kWmec.

La unidad de control generará dos señales de corriente con valores de entre 4mA y 20 mA para representar el torque medido y la potencia.

En la puesta marcha del sistema con el motor parado se debía obtener 4mA, pero en cambio generaba una corriente de 3,96 mA. La solución para este problema es ajustar el calibrado de las señales. Para ello el dispositivo dispone de un pulsador de offset. Mediante el cual se ajusta los miliamperios que corresponden para la potencia real que se esta generando.

Sería de mayor precisión calibrar la señal en tres puntos; cuando el motor está parado, a media y a máxima carga. Teniendo en cuenta que la unidad de control se encuentra debajo del eje, se realiza la calibración con el motor parado por peligrosidad. Entonces con el motor parado pulsamos el offset hasta obtener los 4mA con una potencia de cero kWmec.

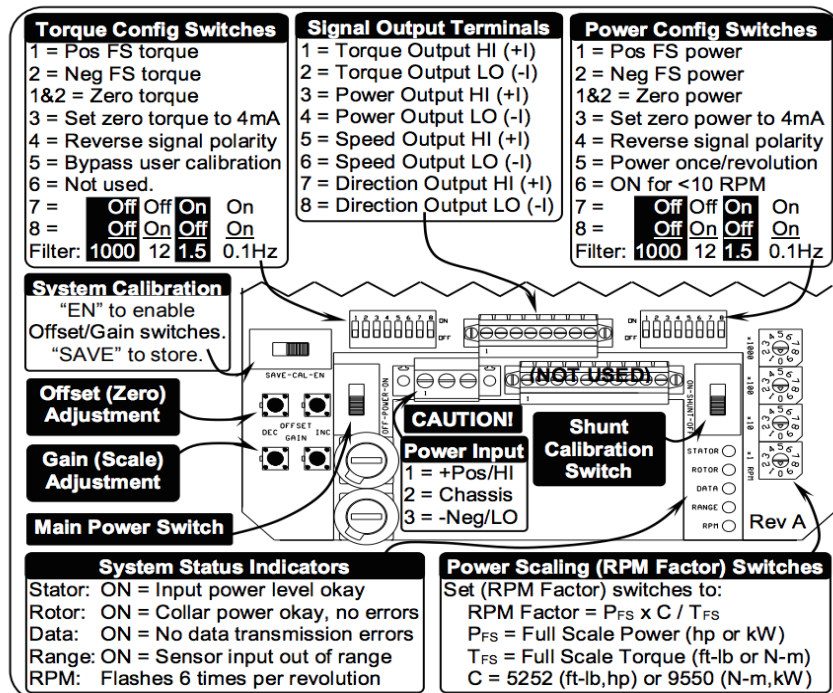


Figura 12. Conexiones y controles internos de la unidad de control [5]

3.2.2.6 Galgas extensiométricas.

La galga extensométrica es un sensor que mide la deformación, capaz de medir cambios relativos en la longitud (deformaciones).

Se utilizan las bandas extensométricas en los torsiómetros para determinar el momento de torsión efectivo. A partir del cual se puede calcular la potencia transmitida para un eje de rotación.

Entonces la tarea de la galga es medir la cantidad de deformación de un elemento.

Para que la galga pueda medir la deformación que sufre el área de la superficie del eje, esta debe estar adherida al eje con precisión, como si de una sola pieza se tratara. Se debe pegar con un adhesivo específico para galgas. Aplicando una delgada película de pegamento para no crear un grosor de pegamento entre la superficie y sensor, evitando que absorba parte de deformación.

El sensor convierte el cambio de dimensión en un cambio de resistencia eléctrica. Cuando la galga extensométrica se comprime su resistencia eléctrica se reduce y, cuando se estira su resistencia aumenta.

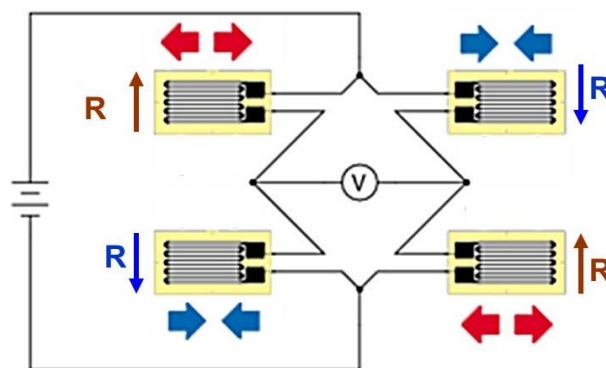


Figura 13. Representación del funcionamiento de la gala extensométrica [19]

En la figura 13 se entiende que, la compresión y/o la elongación de los brazos de la galga hace experimentar un cambio de la resistencia de cada rejilla, provocado por la torsión del eje.

El diferencial en la resistencia que experimenta permite calcular la deformación de la galga. La relación entre la deformación mecánica y la resistencia eléctrica es lo que se conoce como el Gage Factor. Es un coeficiente específico para cada galga extensométrica utilizada. Esta la proporciona el fabricante junto con sus características.

En general, las galgas están hechas de un filamento metálico muy fino dispuesto en un patrón de cuadrícula. La resistencia eléctrica de la rejilla metálica del medidor de deformación cambia en proporción a la cantidad de deformación experimentada por el eje.

3.2.2.7 El circuito de puente de Wheatstone

Los sensores de deformación diseñados para la medición de torque utilizan el puente Wheatstone para medir la resistencia eléctrica y, paso seguido determinar el cambio relativo en la resistencia.

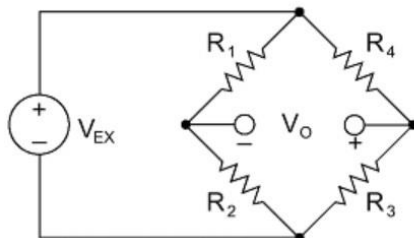


Figura 14. Circuito puente de Wheatstone [12]

Los cuatro ramales del puente están formados por las resistencias R1, R2, R3 y R4. Se le aplica un voltaje de excitación (V_{EX}) a la galga. La tensión de salida del puente (V_O) es la señal de medida. A medida que cambia la resistencia de cada uno de los brazos (debido a una deformación), el voltaje de salida también cambia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_O = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * V_{EX} \quad [6]$$

La medición del voltaje de salida (V_O) se puede correlacionar con una lectura de par mediante un cálculo interno (el fabricante no lo proporciona) que realiza la unidad de control. Esta ecuación incluye las propiedades del eje, la velocidad de rotación y el voltaje medido.

Los medidores de deformación vienen en muchas formas, tamaños y patrones diferentes según el tipo de esfuerzo que se esté midiendo. Cuando se mide el torque en un eje, es esencial que se instale un medidor de deformación con patrón de torque, de tal manera que capture la tensión máxima en los cuatro brazos activos del puente Wheatstone.

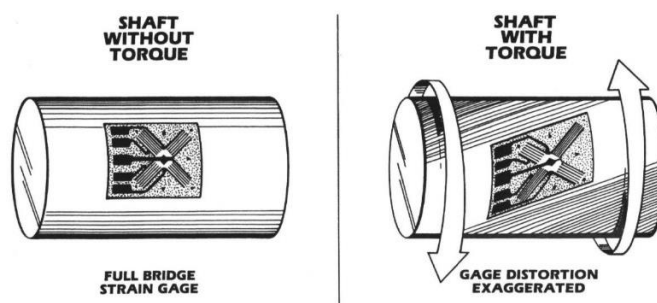


Figura 15. Comportamiento de la galga junto al eje en parado y en marcha [5]

Cuando el sensor se instala correctamente, dos brazos del puente Wheatstone experimentan una tensión de tracción máxima, mientras que los otros dos brazos experimentan una tensión de compresión máxima. Los valores de resistencia de la medición de deformación son los que se utilizan para llegar al valor de voltaje (y finalmente par) calculado anteriormente.

En la figura 16 se muestra una galga extensométrica diseñada para la medición de torque. Se caracterizan por ser de puente completo y se disponen con 4 rejillas desfasadas 90° entre si. Las resistencias del puente de Wheatstone se dispondrán con esa posición.

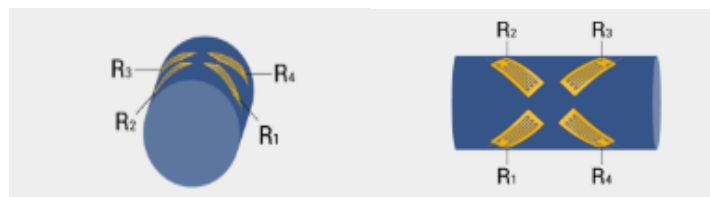


Figura 16. Posición de las galgas para captar correctamente las tensiones [11]

En la figura 17, se presenta la galga que ha sido diseñada para el proyecto que, por la posición de las resistencias se verifica que está diseñada para medir torque. Esta debe ser adherida al eje y posteriormente ser cableada hasta el anillo rotatorio.

En la parte inferior dispone de 5 almohadillas de conexiones. Se sueldan mediante soldadura de estaño al cable de conexión que dispone el torsiómetro. La señal de la banda llegará a la unidad de control donde se realizan los cálculos para obtener las señales resultantes de torque, potencia y rpm (mediante la señal de la galga y parámetros del motor introducidos inicialmente).

- Las conexiones deben ser:

Conexión número 1: Negativo de la conexión de excitación.

Conexión número 2: Positivo señal de salida para medición.

Conexión número 3: Negativo señal de salida para medición.

Conexión número 4: Puenteada con conexión número 2.

Conexión número 5: Positivo de la conexión de excitación.

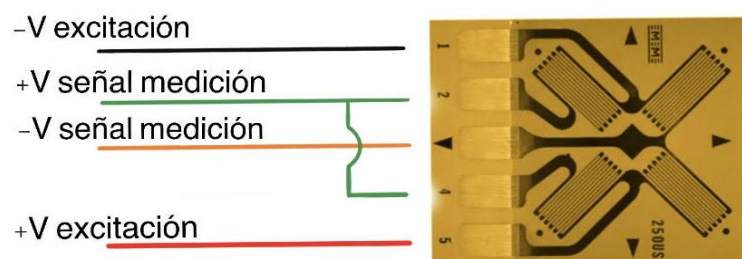


Figura 17. Conexión del Sensor (Fuente: Propia)

3.2.2.8 Ubicación del torsiómetro

El instrumento de medición se ha instalado entre el motor y el alternador. Concretamente, el anillo rotatorio junto con el estático se encuentra montados en el buje o machón (elemento que acopla el eje del motor con el eje del alternador), mientras que la galga extensométrica se encuentra adherida en el eje del alternador. Se descartó la instalación de la galga en el buje por ser hueco. Los cálculos se complican y se puede perder precisión en elementos huecos.

Tras el estudio de la instalación con el fabricante, se encontró la solución de montar la estructura del torsiómetro en el buje, y la galga en el eje del alternador.

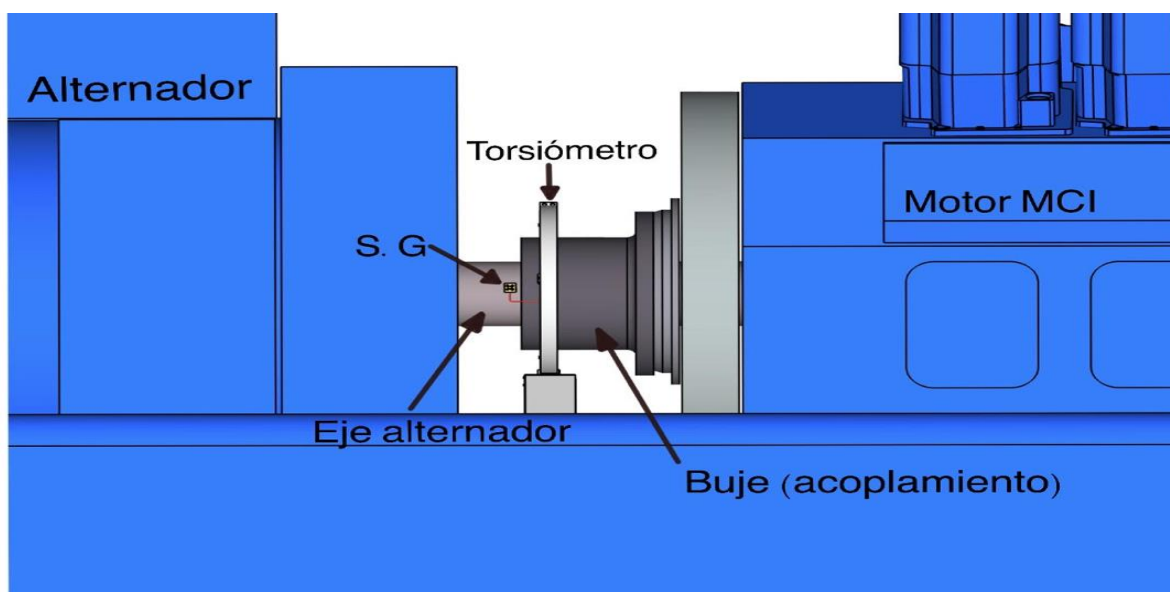


Figura 18. Diseño de la ubicación del torsiómetro (Fuente: Propia)

El acoplamiento del motor es de tipo elástico. El buje permanece unido mediante pernos a un disco que parcialmente es de goma. Aunque el acoplamiento sea de goma, el torque es constante a lo largo del eje. Este elemento absorbe cualquier pico de torque antes de ser transferido al alternador, así que no supone ningún problema para la medición del torsiómetro.

El torsiómetro ha sido fabricado a medida para el diámetro del buje. El anillo dinámico hecho de nylon fundido es realizado con gran precisión para que encaje perfectamente en el buje.

Cabe enfatizar que este anillo está expuesto a una gran velocidad de rotación, además solo existe una pequeña cámara de aire de 5mm entre anillos. La alineación del anillo estático con el anillo dinámico supone todo un reto.

3.2.2.9 Adhesivo para galgas extensiométricas.

Existen múltiples tipos de adhesivos dependiendo del sensor y la aplicación. Las condiciones de trabajo (temperatura, humedad, etc...), los materiales a unir y la precisión de pegado que se requiere son algunos de los parámetros que determinan la elección del adhesivo más adecuado.

El adhesivo tiene como objetivo asegurar la correcta fijación del sensor en la superficie del eje. Por otra parte, debe permitir la transmisión de la deformación desde la superficie de medición hasta la galga extensométrica sin pérdidas.

En el análisis de tensiones habitualmente se utilizan adhesivos de curado en frío. Se caracterizan por ser pegamentos instantáneos de un solo componente que empieza a curar en contacto con el aire.

El adhesivo seleccionado tiene el nombre de "Z70", basta una delgada capa para fijar seguramente el sensor. El tiempo de pegado es realmente corto, no supera el minuto de secado.

Conociendo que utiliza la humedad del ambiente como catalizador (acelera la reacción química), en zonas muy secas o frías el secado puede tardar más en curar y puede afectar a la calidad del pegado.

El pegamento se aplica primeramente en la superficie del eje y se esparce creando una fina película. Posteriormente se pone el sensor y se presiona firmemente un minuto con el pulgar.

En el momento de aplicar el adhesivo se ha prestado especial atención en llevar a cabo las siguientes recomendaciones.

- El adhesivo debe estar a la misma temperatura de la sala antes de abrir el recipiente. De esta manera se previene que la humedad entre en el recipiente afectando al pegamento.
- Aplicar solo una delgada capa, una gran cantidad retardaría el curado no asegurando el perfecto pegado.
- Mientras se aplica el adhesivo en el eje se intenta que no caiga pegamento en el sensor, ya que durante el tiempo que estamos esparciendo el pegamento habría un endurecimiento parcial en el sensor. Podría conllevar problemas en la transmisión de la deformación.
- No tocar el pegamento con los dedos directamente. Junto con el pegamento van provistas unas cintas de flouropolímero (goma sintética con gran resistencia a temperatura y químicos agresivos) de protección.

3.2.3 Instalación del torsiómetro.

A continuación, se redactan los pasos que se han seguido para la correcta instalación del torsiómetro. Siguiendo las recomendaciones del fabricante, primeramente, se ha instalado la galga extensométrica, consecutivamente el anillo dinámico y finalmente el anillo estático con la unidad de control.

3.2.3.1 Procedimiento para la instalación de las galgas extensométricas.

Conociendo que el sensor debe percibir todo desplazamiento que se produzca en la superficie y, por este motivo debe estar perfectamente pegada, se ha preparado la superficie de la siguiente manera.

1. Se retira la pintura u otros recubrimientos y se inspecciona el eje en busca de posibles residuos que pudieran contaminar el pegado. Se usa una solución desengrasante y disolventes para la limpieza.
2. Lijado del área de la ubicación del sensor con papel de grano de 220 (grano grueso). Volver a limpiar la zona mediante desengrasante, y volver a lijar, pero esta vez con papel de grano de 400 (grano fino). Limpiar el área mediante papel con cuidado de limpiar siempre en una misma dirección. No se permite que ningún producto de limpieza se seque en la superficie, puesto que puede dejar una película de contaminante que puede reducir la unión.
3. El sensor debe quedar perfectamente alineado con el eje. La desalineación de menos de 4 grados no generará errores.
4. Para marcar el eje se utiliza papel de folio cuadriculado. Se corta una tira de cuadrícula, se presenta alrededor del eje y se alinean todos los bordes. A continuación, se realiza el marcaje en la zona preparada.

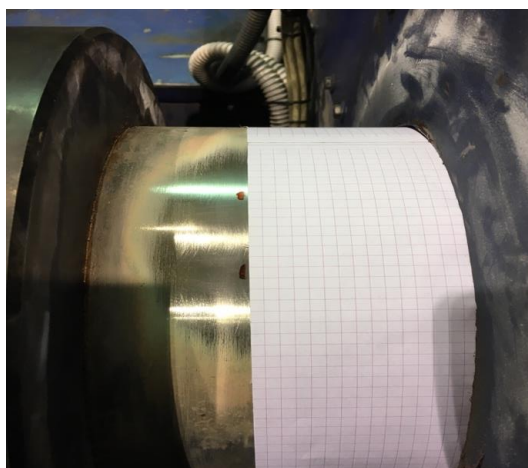


Figura 19. Procedimiento para marcar el eje (Fuente: Propia)

5. Es imprescindible retirar la galga de su paquete usando pinzas para no contaminarla. Se acomoda encima de una superficie limpia con las almohadillas de conexión hacia arriba. Para facilitar el pegado se corta una tira de cinta adhesiva de 15 cm y se adhiere lentamente hasta tener el medidor pegado en la cinta. Se deja un sobrante de 5 cm de cinta a cada lado.
6. Sin tocar el sensor, se sostiene la cinta y se posiciona en el eje. Para alinearlos correctamente se hacen coincidir las marcas realizadas con las que lleva el medidor impresas en él. Se afirma bien la cinta con el sensor en el eje.
7. Para aplicar el adhesivo se despegua un lado de la cinta levantando el medidor, mientras el otro permanece bien pegado para no tener problemas con la alineación. Se aplica una delgada película de pegamento y se pega el sensor en el eje. Para repartir el pegamento y presionar con los dedos se utiliza cinta de flouropolímero para no quedarse pegado.
8. Se mantiene presionado durante un minuto con los dedos. La cinta adhesiva debe permanecer durante 5 minutos adicionales.

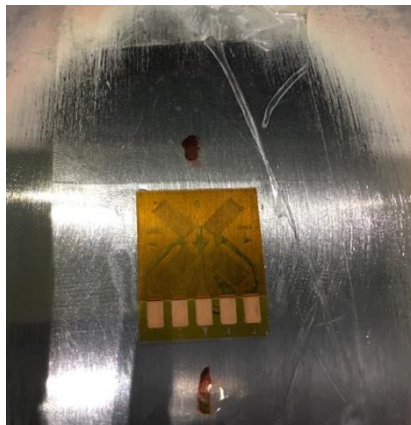


Figura 20. Pegado de la galga siguiendo las marcas de alineación (Fuente: Propia)

9. A continuación, se realiza el cableado del medidor mediante soldadura con estaño. Por último, se sujetan los cables con cinta.

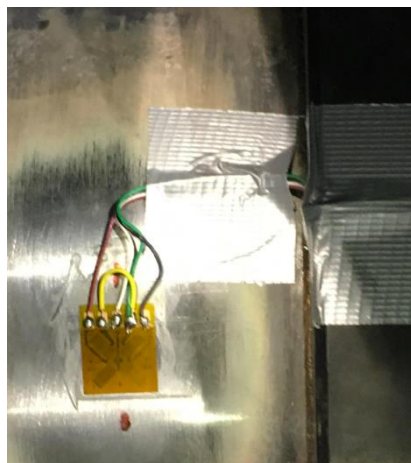


Figura 21. Cableado del sensor y fijación de los cables (Fuente: Propia)

3.2.3.2 Procedimiento para la instalación del torsiómetro.

En primer lugar, se colocan las dos partes semicirculares que conforman el anillo dinámico. Los pernos se colocan de forma opuesta para mantener el equilibrio. Se aplica un fijador de roscas para asegurar su apriete. Importante roscar los pernos de cada lado progresivamente para que el apriete quede igual en ambos lados.

Se realizan las conexiones de los puentes de conexión que conectan las dos partes semicirculares mediante los conectores denominados "Jumper wires" (filamento rígido en forma de U que conecta los terminales de cada semi-anillo).

Para la instalación de la unidad de control y el anillo estático se realiza una sencilla estructura para sujetarlos. Se compone por una viga de acero UPN (Perfil U Normal) con dos platinas soldadas a cada extremo, el conjunto se atornilla en la bancada del motor. En el centro de la viga se suelda una platina donde atornillar la unidad de control.

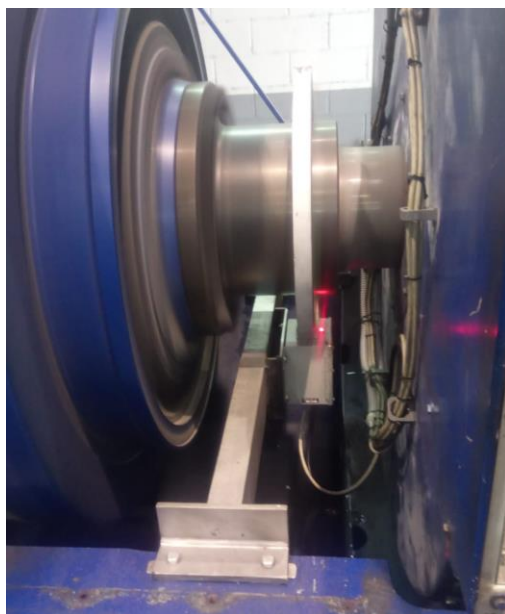


Figura 22. Montaje final del sistema (Fuente: Propia)

Una vez montada la viga, se instala seguramente la unidad de control y el anillo estático. Se alinea el conjunto con el anillo dinámico introduciendo finas laminas metálicas (galgas metálicas) entre la unión de la viga y la bancada.

Llegado este momento se cablean las señales desde la unidad de control hasta el PLC. Por otra parte, pero a la vez, desde el cuadro eléctrico del motor G-5 se pasa un cable para alimentar el torsiómetro con una tensión de 220VAC.

Finalmente, se configura la unidad de control con los valores calculados en el apartado "*cálculos de parámetros de configuración*", y se calibran las señales.

3.3 Monitorización de los fluidos térmicos.

Los fluidos térmicos del motor suponen un gran aprovechamiento energético y, no se conocía con certeza el rendimiento total que suponen. Antes del proyecto la energía mediante fluidos térmicos se contabilizaba globalmente (la producción total de energía térmica de los 5 motores). Se decide monitorizar las energías térmicas en forma de fluidos calorportadores.

Los aprovechamientos de calor en forma de fluidos térmicos se dividen en tres:

- Calor disipado en circuito refrigeración de componentes (es el mismo circuito de refrigeración con el que se ensaya el nuevo refrigerante de alto rendimiento).
- Calor disipado en circuito de intercoolers (trabaja a 40°C aprox.)
- Calor disipado en circuito de aceite lubricante.

Existe un circuito denominado “circuito de calefacción” que absorbe el calor del circuito de aceite y de camisas mediante un intercambiador. Mediante este circuito se distribuye agua a 85°C a las diferentes aplicaciones industriales que requieren de esta energía. Dicho circuito también ha sido monitorizado.

Para realizar las monitorizaciones de los diferentes aprovechamientos térmicos, se requiere de la instalación de cuatro caudalímetros nuevos. Siguiendo la figura 23 se identifican los diferentes circuitos y los caudalímetros instalados.

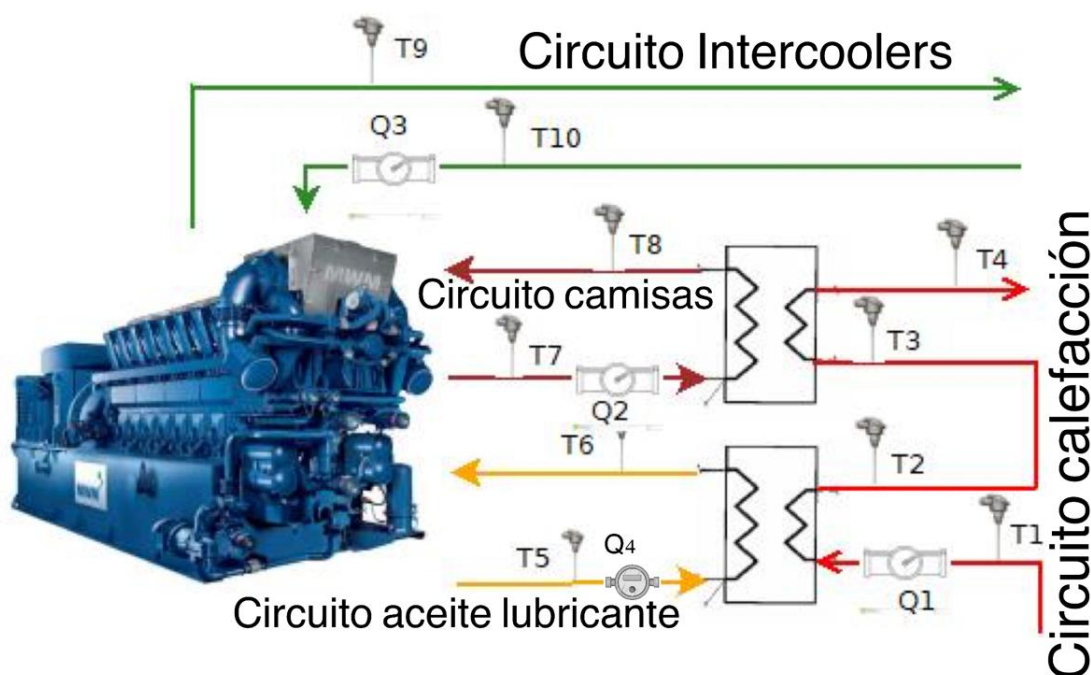


Figura 23. Aprovechamientos térmicos del motor (Fuente: Propia)

Para realizar el cálculo de la energía térmica que está generando cada circuito se requiere del caudal instantáneo y el diferencial de temperaturas. Se utilizará la siguiente fórmula para realizar los cálculos de todos los aprovechamientos.

$$E_T [\text{kW}] = Q \cdot \rho \cdot C_e \cdot (T_{\text{salida}} - T_{\text{entrada}}) \quad [7]$$

E_T [kW]	Energía térmica generada
Q [m ³ /s]	Caudal instantáneo medido
ρ [kg/m ³]	Densidad: agua (977 kg/m ³), aceite (897kg/m ³)
C_e [kJ/kg °C]	Calor específico: agua (4,18 kJ/kg), aceite (2,15 kJ/kg)
T [°C]	Temperatura del punto medida

Tabla 11. Descripción parámetros ecuación energía térmica (Fuente: Propia)

Afortunadamente la mayoría de las sondas de temperatura ya estaban instaladas (ya que las requiere el motor para el control de temperaturas), solo ha sido necesario instalar una sonda en la salida de aceite del motor y otra en la salida del agua de intercoolers. En la figura 23 se identifican como la T5 y la T9.

En la figura 23 también se pueden identificar todos los caudalímetros y sondas que se utilizan para realizar los cálculos. Finalmente se calculan las siguientes energías:

Energía agua alta temperatura (circuito refrigeración componentes):

$$H_{AT} = Q_2 \cdot C_e \cdot \rho \cdot (T_7 - T_8) \quad [8]$$

Energía absorbida por el circuito de calefacción

$$H_{cc} = Q_2 \cdot C_e \cdot \rho \cdot (T_4 - T_1) \quad [9]$$

Energía entregada por el aceite de lubricación:

$$H_{EA} = Q_4 \cdot C_e \cdot \rho \cdot (T_5 - T_6) \quad [10]$$

Energía absorbida por el aceite de lubricación:

$$H_{AA} = Q_1 \cdot C_e \cdot \rho \cdot (T_2 - T_1) \quad [11]$$

Energía absorbida de agua de alta temperatura:

$$H_{AAT} = Q_1 \cdot C_e \cdot \rho \cdot (T_4 - T_3) \quad [12]$$

Energía entregada de agua de baja temperatura:

$$H_{BT} = Q_3 \cdot C_e \cdot \rho \cdot (T_9 - T_{10}) \quad [13]$$

3.3.1 Caudalímetro electromagnético

Para realizar este conteo de caudal se ha seleccionado un caudalímetro electromagnético. El funcionamiento de este instrumento se basa en la ley de Faraday. Para entender mejor su funcionamiento se muestra la siguiente teoría.

Ley de inducción de Faraday:

$$E = V \cdot D \cdot B \quad [14]$$

Donde, E es el voltaje generado en un conducto, V la velocidad del fluido que circula por el contador, D el diámetro del conducto y B la intensidad de campo magnético.

Viendo esto, si se genera un campo magnético en el ancho de la sección de conteo y circula un fluido, obtendremos un voltaje mediante los electrodos laterales, que es directamente proporcional a la velocidad del fluido. Una vez obtenida la velocidad del fluido y como se conoce el diámetro de la tubería, se encuentra fácilmente el caudal.

Este instrumento no se compone por ningún elemento móvil. No genera una caída de presión y su mantenimiento es mínimo.

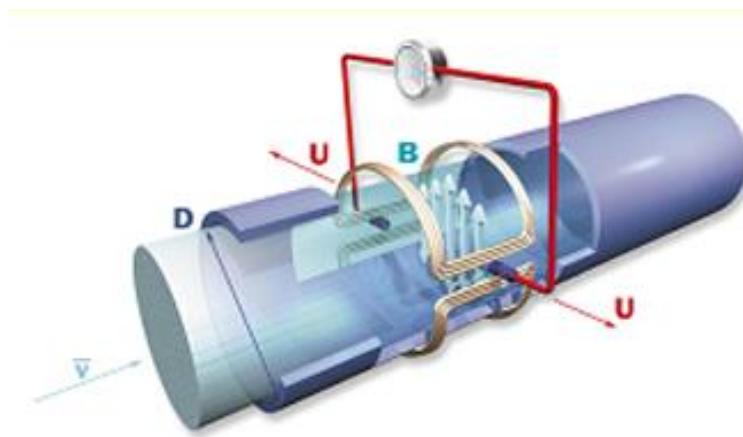


Figura 24. Teoría de funcionamiento del caudalímetro [15]

Existen múltiples marcas y modelos que utilizan esta tecnología. Para este proyecto se ha elegido dos modelos del fabricante ENDRESS+HAUSER. El funcionamiento es el mismo pero un modelo soporta hasta 98°C y el otro hasta 50°C.

Para el circuito de refrigeración de camisas y el circuito cerrado se ha seleccionado el modelo PROMAG P 500 (hasta 98°C). En cambio, para el circuito de intercoolers se la elegido un PROMAG W 400 (hasta 50°C).

Para los dos modelos se ha elegido la opción remota, en que el sensor y el transmisor (display) vienen separados. El motivo es debido a que las altas vibraciones del motor podrían dañar la electrónica del contador. En la imagen 25 se muestra un ejemplo, el sensor se compone por el conducto por donde circula el agua y donde se generará la Ley de inducción de Faraday. El transmisor alimenta al sensor con un voltaje para poder crear el campo magnético y, por otro lado, recibe la señal de tensión para calcular el caudal instantáneo. El cual genera una señal 4...20 mA que se puede cablear hasta el PLC para visualizar el caudal y realizar los cálculos.

Comúnmente este sistema viene integrado todo en uno.



FIGURA 25. Caudalímetro electromagnético [16]

3.3.2 Caudalímetros de vórtice

En relación con la medición del caudal del aceite lubricante se ha utilizado un caudalímetro Vortex. Dicho instrumento se compone por un conducto con un nervio vertical en el interior. Esto generará que se formen turbulencias tras pasar el obstáculo del nervio. La velocidad del fluido tiene que ser alta para conseguir que se creen vórtices. La frecuencia de desprendimiento de los vórtices a cada lado del nervio es proporcional a la velocidad media de circulación del fluido y, por lo tanto, al caudal volumétrico.

El modelo comprado es un PROWIRL F 200 remoto, también del fabricante ENDRESS+HAUSER.

3.3.3 Instalación de los caudalímetros

La instalación se divide en la parte del montaje mecánico y, posteriormente, en los trabajos eléctricos para cablear los instrumentos y realizar las conexiones.

En primer lugar, se realiza la instalación mecánica y, para ello, se debe tener en cuenta la posición en que se instalan. Se debe dejar una distancia de tramo recto de 5 veces el diámetro del conducto antes del contador y una distancia de 2 veces después del contador. Si no se respetan estas distancias el flujo no será laminar y, por tanto, cabe la posibilidad de que la medición no sea correcta.

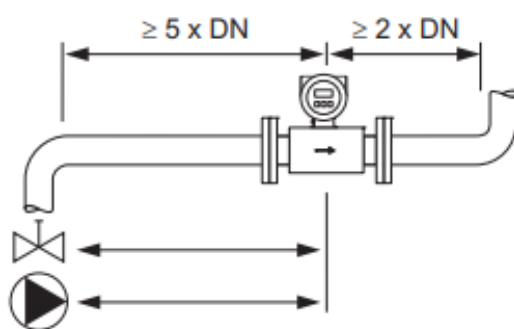


Figura 26. Instalación de un caudalímetro [4]

Conociendo los diámetros de los conductos del motor se calculan las distancias que se deben dejar antes y después del contador.

Descripción Circuito	Diámetro tubo	Distancia previa	Distancia posterior
Circuito camisas	150 mm	750 mm	300 mm
Circuito calefacción	150 mm	750 mm	300 mm
Circuito intercooler	125 mm	625 mm	250 mm
Circuito Aceite	150 mm	750 mm	300 mm

Tabla 12. Cálculos de las medidas necesarias para instalar los contadores (Fuente: Propia)

Para la instalación de los caudalímetros se ha cortado el tramo de tubo necesario para introducir el caudalímetro más la distancia necesaria para soldar una brida a cada lado. En resumen, se debe cortar una distancia que incluye la longitud del contador, el ancho de dos bridas y el espesor de dos juntas. Una vez se corta el tubo se suelda una brida en cada extremo del conducto y finalmente mediante tornillería se monta el caudalímetro con dos juntas de papel a cada lado.

En primer lugar, se ha instalado el sensor de caudal en el circuito de refrigeración de componentes. En la figura 27 se muestra la instalación final del caudalímetro.



Figura 27. Instalación final caudalímetro circuito refrigeración camisas. (Fuente: Propia)

A continuación, en la figura 28 se observa el resultado de la instalación del caudalímetro en el circuito de calefacción. A escasos centímetros del lugar donde se ha instalado el sensor se encontraba una sonda de temperatura. En el manual indica que no pueden encontrarse cerca del sensor obstáculos que puedan crear un flujo turbulento. La solución ha sido desplazar la sonda hasta cumplir con las distancias mínimas. Aún se puede apreciar a la izquierda del sensor donde se encontraba instalada la sonda.



Figura 28. Instalación final caudalímetro circuito calefacción. (Fuente: Propia)

En el circuito de intercoolers hubo que realizar varias modificaciones para obtener el tramo recto de tubo necesario. Si se presta atención en la imagen 6 se puede apreciar el tramo de tubo nuevo que se ha instalado (conducto negro). Anteriormente este tramo hacia dos curvas que imposibilitaba cumplir con las distancias mínimas de tramo recto.



Figura 29. Instalación caudalímetro circuito intercoolers (Fuente: Propia)

Debido al gran peso del caudalímetro Vórtex se ha fabricado un soporte para sujetar el peso del contador. Los soportes tienen que apoyarse en las bridas. No se puede sujetar el contador por el cuerpo. Estas indicaciones se han seguido estrictamente como marca el manual de instalación. En la imagen 7 se puede observar la instalación del conjunto.

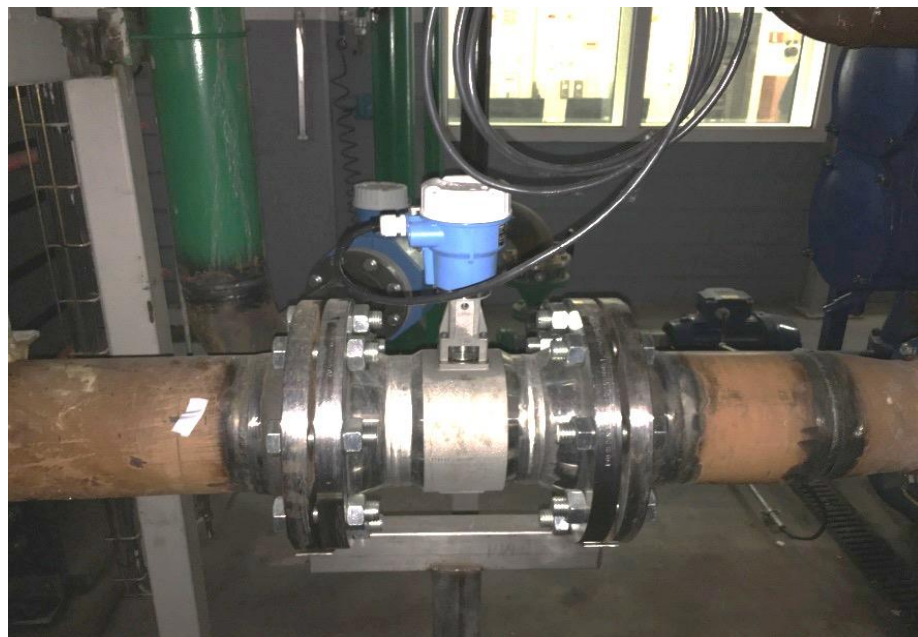


Figura 30. Caudalímetro Vórtex circuito aceite (Fuente: Propia)

En la instalación eléctrica se han realizado las siguientes tareas:

- Alimentar cada transmisor remoto con 24V.
- Cablear el sensor hasta el transmisor remoto (alimentación y señal).
- Cablear las señales de 4...20 mA de cada transmisor remoto hasta el PLC.

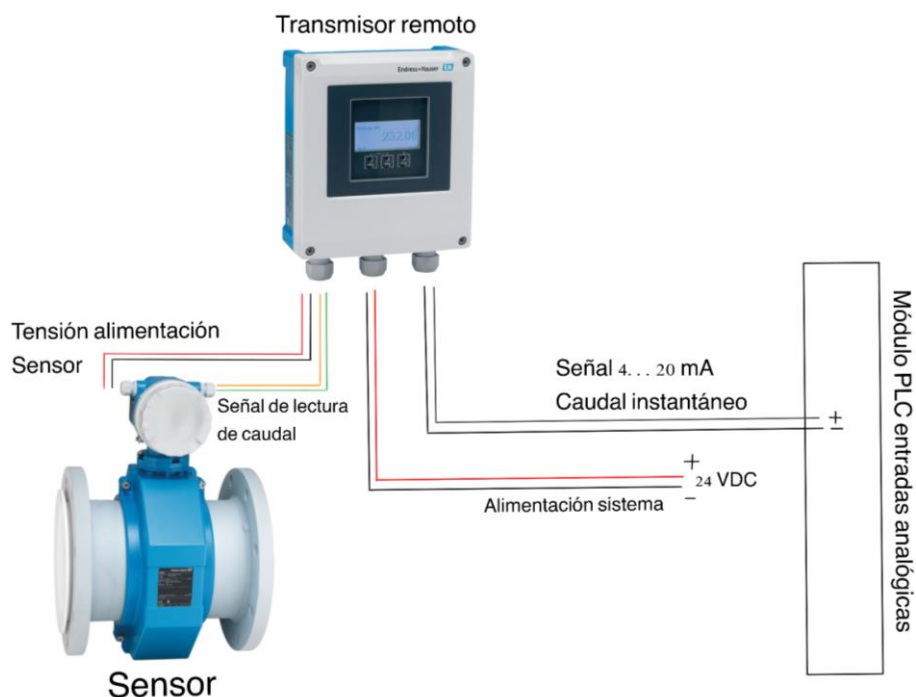


Figura 31. Conexiones caudalímetro electromagnético (Fuente: Propia)

Una vez conectados los caudalímetros empiezan a funcionar y en el transmisor se visualiza el caudal instantáneo. En este momento se configuran las unidades de caudal que se quieren visualizar en el display del transmisor. Finalmente se configura el escalado de señal 4...20 mA que genera el transmisor. Programando el mismo escalado en el PLC se obtiene el mismo caudal. En la tabla 13, se muestra el escalado que se ha configurado en los transmisores. Con este mismo escalado se configurarán las señales analógicas de 4...20 mA que llegan al PLC a fin de obtener los mismos valores.

Descripción de la señal	Señal a 4 mA	Señal a 20 mA
Caudal agua refrigeración camisas	0 m3/h	125 m3/h
Caudal agua refrigeración intercoolers	0 m3/h	80 m3/h
Caudal aceite lubricante	0 m3/h	120 m3/h
Caudal circuito de calefacción	0 m3/h	120 m3/h

Tabla 13. Configuración señales 4...20 mA (Fuente: Propia)

Realizados los trabajos eléctricos, los caudalímetros se ponen en marcha y el PLC empieza a recibir las señales 4...20mA de caudal instantáneo. Todos los transmisores se montan en una pared a salvo de las vibraciones del motor. El resultado se muestra en la figura 32.

El transmisor inferior pertenece al conteo de caudal de aceite lubricante. Aunque es aparentemente distinto contiene las mismas funciones.



Figura 32. Instalación final de los transmisores (Fuente: Propia)

Aproximadamente se obtienen los siguientes caudales para cada circuito:

Descripción del circuito	Valor medio de caudal
Caudal agua refrigeración camisas	105 m3/h
Caudal agua refrigeración intercoolers	70 m3/h
Caudal aceite lubricante	97 m3/h
Caudal circuito de calefacción	98 m3/h

Tabla 14. Valores medios de caudal (Fuente: Propia)

3.4 Gases calientes procedentes de la combustión

La energía térmica de los gases de combustión representa el porcentaje más elevado de los aprovechamientos térmicos que genera el grupo. Se determina registrar en tiempo real la potencia térmica que poseen los humos de combustión. Paso seguido, mediante las lecturas de gas se implementará el cálculo del rendimiento térmico que supone esta energía.

Potencia del motor	3800 kW
Consumo combustible	8.749 kW
Calor gases de escape	2.178 kW

Tabla 15. Valores teóricos de gases de escape (Fuente: Propia)

En la tabla 15, se exponen los valores teóricos que debería cumplir el motor trabajando al 100% de carga.

En este apartado se describe la teoría de esta aplicación, los cálculos necesarios y la instalación. Los resultados finales se muestran en el capítulo 9.

Como se puede apreciar en la figura 33 los humos se conducen por un conducto de 800 mm de diámetro califugado. Es en el tramo horizontal donde se realiza el contaje de los gases procedentes de la combustión del motor.



Figura 33. Imagen de la salida de humos del motor (Fuente: Propia)

3.4.1 Tubo de pitot

Los dispositivos más utilizados para la medición de caudales de gases en grandes conductos industriales es el tubo de pitot. Con este método el caudal se calcula de forma indirecta mediante el cálculo directo de la diferencia de presión que se produce en el pitot.

Básicamente se compone por un tubo que dispone de una serie de orificios realizados a lo largo del conducto. Este se coloca de forma que unos orificios quedan directamente contra el sentido de los gases y los otros de espaldas al sentido del flujo.

La parte frontal del tubo está expuesta a la presión estática más a la presión dinámica. En otras palabras, la suma de la presión de los gases más la presión que genera el impacto directo de los gases. Por otro lado, la parte trasera del tubo solo estará expuesta a la presión estática. En la figura 34 se puede visualizar el diferencial de presiones que se crea entre los dos lados

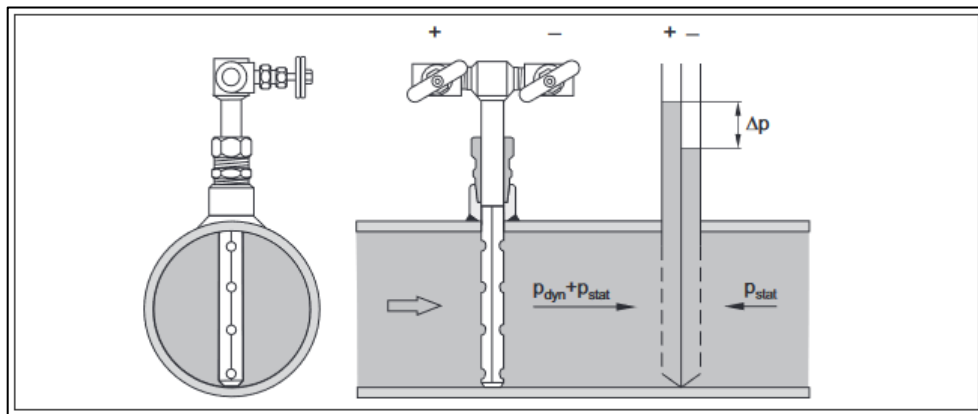


Figura 34. Tubo de pitot en el interior de un conducto de gases [10]

Dentro del tubo hay dos compartimientos por donde se transmite las presiones de cada parte del tubo hasta llegar a dos válvulas. Ambas presiones se conducen hacia un transmisor de presión diferencial.

El transmisor se encargará de traducir el diferencial de presión en una señal eléctrica que se pueda usar para realizar los cálculos de caudal deseados.

El interior del transmisor se compone por una membrana con un sensor. Las dos presiones llegan a cada lado de la membrana por separado. La posición que el sensor capta de la membrana se convierte en una señal eléctrica equivalente a la presión diferencial.

Se utiliza una señal de lazo de corriente (4...20mA) para el diferencial de presión.

3.4.2 Cálculos de caudal de gases

Con la ecuación 15 se calcula el caudal instantáneo de humos.

Dicha ecuación se ha programado en el PLC para que mediante la señal de 4...20mA de presión diferencial consiga calcular el caudal de gases que fluyen por el conducto.

En la tabla 16 se pueden ver una serie de constantes (ε , K, k) de diseño que las proporciona el fabricante en la entrega del instrumento. Estas son necesarias para el cálculo.

$$Q_m = K \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot P_b} \quad [15]$$

Nomenclatura	Definición	Unidades
ΔP	Diferencial de presión	Pa
P_b	Densidad del medio	Kg/m ³
ε	Factor de expansión	1
K	Factor k del tubo de pitot	1
A	Área seccional conducto	m ²
Q_m	Caudal másico	Kg/s
b	Diámetro del conducto	m

Tabla 16. Descripción parámetros ecuación caudal de gases (Fuente: Propia)

El PLC también realizará las operaciones de la potencia térmica de gases de combustión. Para ellos se utiliza la siguiente formula:

$$P_{\text{gases}} [\text{kW}] = Q_m \cdot h_{\text{gases}} \quad [16]$$

Donde, P_{gases} es la potencia térmica, h_{gases} es el valor de entalpia de los gases y Q_m el caudal másico de gases.

Finalmente, mediante la siguiente ecuación, se calcula el rendimiento térmico por gases de escape que genera el motor.

$$\eta_{\text{EG}} = \frac{\text{Energía térmica gases}}{\text{Consumo de gas} \cdot \text{PCI}} \quad [17]$$

3.4.3 Instalación para la monitorización del caudal de humos

Para realizar esta monitorización se han aprovechado ciertos instrumentos de una instalación que dejó de funcionar. Anteriormente en las instalaciones de BONAREA de Bujaraloz (Zaragoza) se encontraba en marcha un motor de fuel. Con los humos que producía este motor se secaba alfalfa mediante una deshidratadora. El motor fue sustituido (quedando como motor de reserva) por un motor de gas MWM TCG 2032 V16.

Se utilizaba el tubo de pitot para contabilizar la energía de humos que se aportaba a la deshidratadora para secar la alfalfa. Quedando sin uso alguno, el sistema de contaje se desmonta y se trae a las instalaciones de Guissona.

Conociendo que el tubo de pitot se diseña especialmente para cada instalación, se contacta con el fabricante ENDRESS+HAUSER para estudiar la posibilidad de montar este sistema en el motor del proyecto.

Coincidiendo que el diámetro del conducto es el mismo y el caudal de los humos es parecido, el error de medición que puede haber es mínimo y, se decide llevar a cabo la adaptación.

En la figura 35 se muestra el tubo de pitot que se ha reutilizado. Aunque está ennegrecido por su uso, el estado general del tubo es bueno. Se comprueban los grifos y el interior del tubo.



Figura 35. Tubo de pitot reutilizado (Fuente: Propia)

Otro elemento que se ha conseguido adaptar a esta nueva instalación es el transmisor de presión. El fabricante del instrumento es ENDRESS+HAUSER y, concretamente, es el modelo DELTABAR PMD235. Actualmente, ya está descatalogada esta serie de los modelos DELTABAR.



Figura 36. Transmisor de presión DELTABAR PMD235 (Fuente: Propia)

Para comprobar su funcionamiento se conecta en el transmisor un multímetro especial para señales de 4...20mA. Se aplica una pequeña presión de aire y el resultado de la prueba resulta satisfactorio.

Se le instalan dos válvulas a cada entrada del transmisor como mejora. El motivo del montaje de estas válvulas es para poder purgar los posibles condensados que se generen en el interior de este sistema.

Por otro lado, incorporadas al cuerpo del transmisor dispone de dos válvulas para cerrar o abrir el paso de la presión de los humos hacia cada lado de la membrana.

Finalmente, dispone de una válvula de bypass que comunica los dos conductos. Esta se utiliza para calibrar la señal. Para calibrar la senyal 4...20 mA hay que realizar un juego de movimientos de válvulas y selectores. En este documento no se entrará en la explicación de como llevar a cabo dicha calibración.

En la figura 37 se muestra el esquema general de la instalación. En la izquierda del esquema está situado el tubo de pitot en el interior del conducto, paso seguido se conducen las presiones hasta

el transmisor de presión pasando por las válvulas de cierre y calibración. En el transmisor se convierte el diferencial de presión en una señal analógica que se ha cableado hasta el PLC.

El programador de este PLC ha registrado la señal y ha programado los cálculos que se le han indicado para obtener la medición de caudal instantáneo.

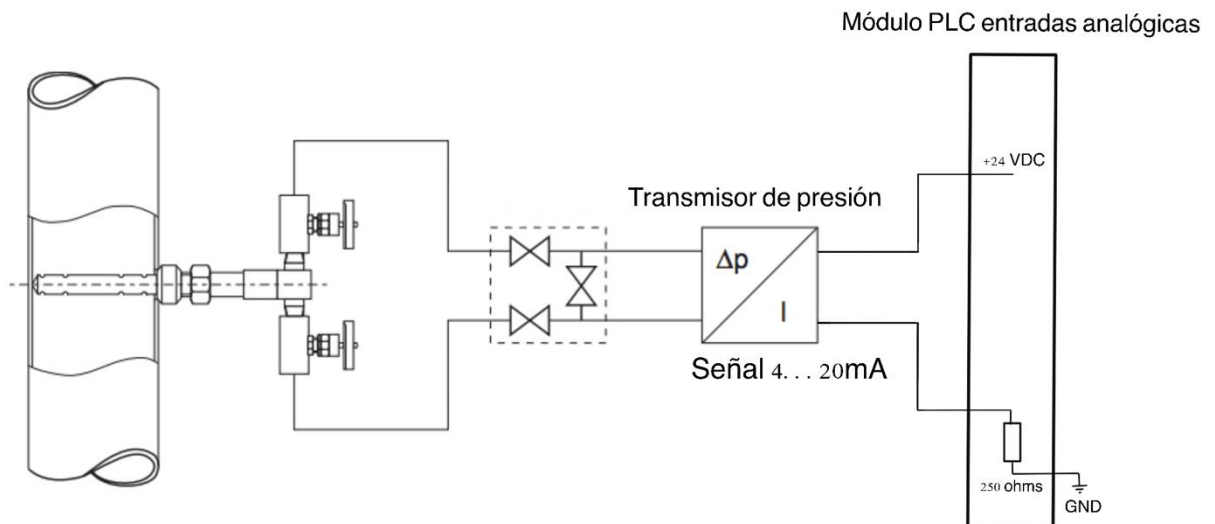


Figura 37. Instalación del sistema de medición de caudal (Fuente: Propia)

Después de realizar todos los trabajos, en la figura 38 se puede observar la instalación acabada. Se han conducido las presiones de los gases mediante tubo de acero.



Figura 38. Instalación final del tubo de pitot (Fuente: Propia)

3.5 Monitorización del consumo de aceite

Para la prueba de campo que se acuerda realizar con el aceite de PETRONAS se decide previamente llevar a cabo la monitorización del consumo de aceite del motor (aceite limpio que entra al motor de forma automática).

Contabilizar con precisión el consumo de aceite es un factor importante para la prueba. Inicialmente, los motores disponían de contadores para registrar el consumo de aceite, pero contenían un error de precisión de $\pm 5\%$.

Se instala en el motor G-5 y G-3 un caudalímetro el cual la precisión es superior, con la intención de elevar la exactitud de contaje y que cualquier mejora en el consumo con el nuevo lubricante se pueda apreciar de la manera más real posible. En el motor G-3 se instala para poder comparar los consumos entre estos dos motores (el motor G-3 utiliza el aceite habitual).

Se ha realizado un estudio de los distintos caudalímetros volumétricos de precisión para aceite que existen en el mercado.

El contador de tornillo helicoidal es uno de los contadores con mayor precisión que existe actualmente. Tiene una exactitud de medida sumamente elevada, pero a la vez requiere de una presión de funcionamiento alta, que sólo se puede conseguir a través de una bomba. Con la prueba de PETRONAS se va a instalar un contenedor de 1000L de aceite en el altillo para alimentar el motor. Este circuito va a funcionar por la presión de la columna de líquido. Debido a que la presión será baja no se puede instalar este tipo de contador.

La opción elegida ha sido un contador de paletas de alta precisión que mantiene su alta exactitud tanto a altos como bajos caudales. Otra de las ventajas que contiene es la baja presión de arranque necesaria (0,03Bar).

El nombre del instrumento es PROFLOW del fabricante holandés VAF INSTRUMENTS, líder del Mercado Naval en sistemas de medida.



Figura 39. Vista general contador PROFLOW [13]

3.5.1 Caudalímetro volumétrico PROFLOW

El caudalímetro volumétrico PROFLOW funciona según el principio de deslizamiento positivo. Se basa en dos pares de paletas unidas en un rotor libre de ningún eje que, mediante el flujo del aceite gira libremente. Este giro libre consigue bajar la caída de presión a 0,03 Bar. La forma del alojamiento guía el movimiento del conjunto rotor-paletas, además de asegurar la estanqueidad de la entrada con la salida.

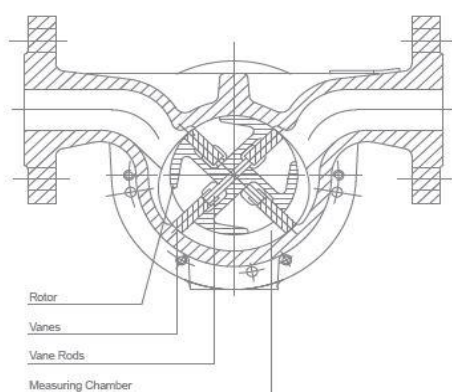


Figura 40. Funcionamiento interno contador aceite [13]

Un imán interno transmite las rotaciones del rotor a la unidad de medida donde se muestra el valor en el display. Dispone de un emisor de impulsos con una frecuencia proporcional al caudal. Con dicha señal se consigue totalizar de forma remota el consumo. En el menú del display permite cambiar la frecuencia para optimizar el rango de impulsos/litro idóneo para cada aplicación.

Las principales características se exponen en la siguiente tabla:

Capacidad máxima	160 l/min
Lectura mínima	0,1 l/0,001m3
Rango de temperatura del fluido	-10 a 160 °C
Material del cuerpo	Acero fundido
Material paletas	Carbono
Peso	12 kg

Tabla 17. Características contador Profflow [13]

3.5.2 Instalación inicial

El sistema de control del motor (TEM EVO) monitorea y vigila la cantidad de aceite en el cárter mediante sensores de nivel. Cuando el nivel baja de un cierto valor automáticamente el sistema de control activa todos los componentes necesarios para alimentar el motor, hasta que el nivel vuelve a estar correcto.

Los cinco motores están conectados a un circuito de aceite común que se alimenta por un depósito de 20.000L, en estos momentos con aceite SHELL MYSELLA S5 N40.

El sistema de control activa entonces una bomba y dos válvulas solenoides para que el aceite fluya desde el depósito hasta el motor y, reponer los litros de aceite necesarios.

3.5.3 Modificaciones para las pruebas y la instalación del contador

En vista de la prueba de campo con PETRONAS se realizan modificaciones en el sistema de aceite para poder alimentar el motor con el nuevo lubricante.

En la parte superior de la sala de cogeneración se encuentra un altillo para acceder a las chimeneas de los motores. Es ahí, donde se ha instalado un depósito de 1000 L con el aceite de PETRONAS. El lubricante fluye hasta el interior del motor por gravedad.

Se ha cerrado la válvula de bola que existe en la entrada del motor para que no pueda entrar aceite *SHELL* y, se ha instalado una T para poder conectar un conducto desde el depósito de PETRONAS hasta la línea de aceite.

El fabricante aconseja instalar un filtro de aceite aguas arriba del contador para evitar que las paletas internas queden bloqueadas debido algún pequeño sedimento o residuo.

Recordando que no se puede generar una pérdida de carga, puesto que el aceite entra en el motor por gravedad, se ha hecho un filtro cilíndrico de malla. El aceite está limpio y no requiere de un filtraje, solo hay que evitar que entren posibles virutas que pueden contener los conductos.



Figura 41. Filtro aceite (Fuente: Propia)

En la siguiente figura número 42 se aprecia con detalle todos los comentarios anteriores. Este diseño está dibujado para facilitar el entendimiento del lector, en la realidad los componentes se encuentran más distanciados.

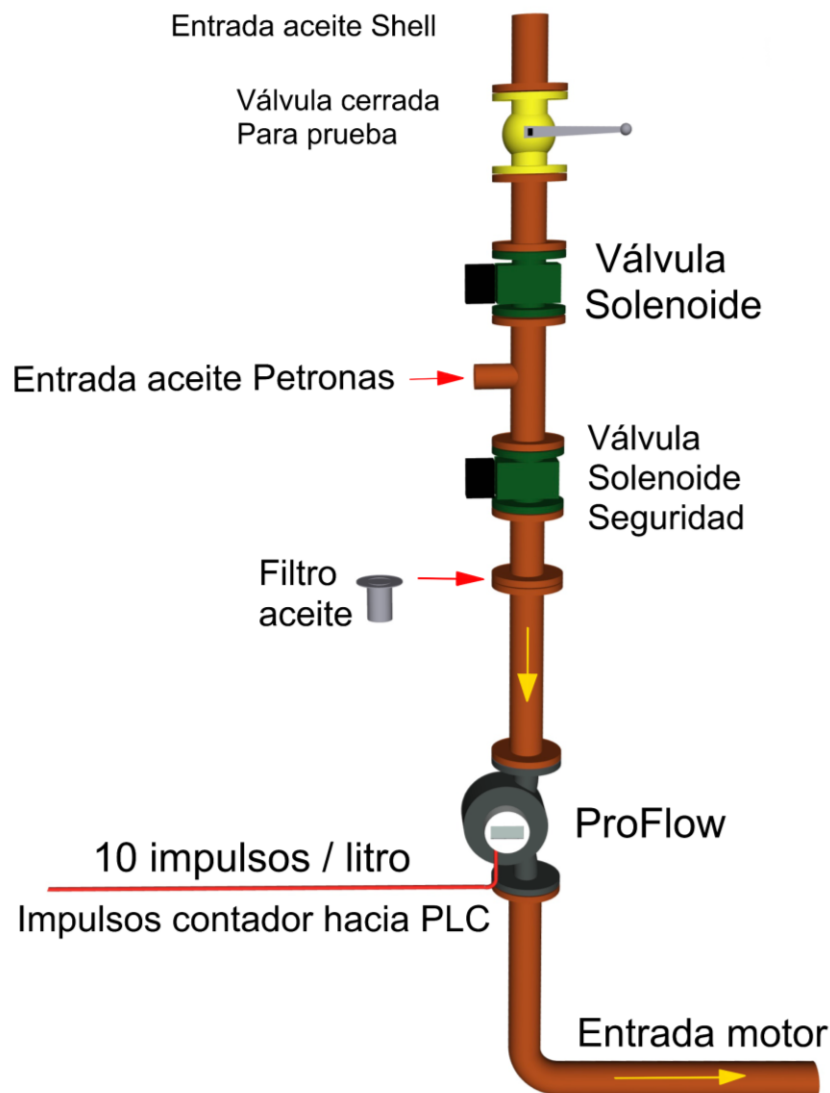


Figura 42. Sistema alimentación aceite (Fuente: Propia)

Una vez realizada la instalación mecánica del contador, el filtro y la T se realizan las tareas eléctricas. Estas consisten en cablear la señal desde el propio contador hasta el PLC para poder recibir remotamente el consumo de aceite.

Por último, se configura el contador para que emita 10 pulsos por litro. Esta información ha sido trasladada al programador para que realice la configuración del PLC y se muestre por pantalla en el SCADA. En resumen, cada impulso que emite el contador es 0,1 L que se acumulan en el contador interno del PLC.

3.5.4 Instalación Final

Se muestra el resultado final de la instalación en la figura 43. Se ha tenido que adaptar los conductos y las bridas al nuevo contador, pues no coincidían las medidas entre ambos contadores.

Con este nuevo instrumento se ha corregido los problemas con la precisión en el contaje de aceite. La retrasmisión de los litros desde el contador hasta el PLC es exacta.



Figura 43. Instalación final del contador de aceite (Fuente Propia)

El fabricante certifica todos sus caudalímetros uno por uno, puesto que son fabricados a medida. De esta manera, a continuación, se presenta la tabla del certificado de calibración para el contador instalado. Se puede observar que la desviación en el contaje es muy pequeña tanto a caudales altos como bajos, una ventaja frente a caudalímetros que requieren siempre de un caudal nominal que no sea bajo.

capacity		Calibrated range capacity		deviation *	
74.1	%	118.5	l/min	0.03	%
28.8	%	46.1	l/min	0.07	%
6.2	%	9.8	l/min	-0.07	%

Tabla 18. Certificado de calibración del fabricante VAF INSTRUMENTS [13]

Capítulo 4. Eficiencia en la transmisión térmica y calidad de los fluidos caloportadores.

Siguiendo la línea del proyecto de mejora de eficiencia. Este apartado se centra en la experimentación de nuevos fluidos caloportadores para aprovechar una mayor cantidad de calor útil del motor.

Se introduce un fluido refrigerante de alto rendimiento en el circuito cerrado de refrigeración del motor. Este circuito se encarga de refrigerar los componentes del grupo, y transportar ese calor hacia un intercambiador para entregarlo a un circuito secundario (circuito de calefacción).

A mayores niveles de eficiencia y potencia la carga térmica de la cámara de combustión aumenta. La disponibilidad y eficiencia de la energía en forma de calor se puede ver incrementada a causa del uso del fluido refrigerante.

La principal tarea del refrigerante es la transferencia del calor de la combustión, mediante el enfriamiento de componentes y proporcionando esta energía como calor útil. De este modo, el refrigerante no es solo el responsable del funcionamiento seguro del motor, sino también del uso eficiente de la energía.

Otra característica de este fluido es la protección contra la corrosión y la cavitación. Por medio de anticorrosivos químicos que forman una película protectora en las superficies metálicas a través de reacciones químicas. De esta forma, se evita que se produzca daños en los componentes que son refrigerados por el fluido.

La empresa suministradora de este producto es MWM. El refrigerante se denomina MWM PREMIUM PROTECT. El circuito en el cual se va a aplicar este líquido tiene una capacidad de 0,75 m³. Se realiza un pedido de 1000L de refrigerante.

Resumiendo, los objetivos del cambio del fluido refrigerante son los siguientes:

- Mejora de la eficiencia energética en forma de recuperación calor a través de una transferencia de calor óptima, aumentando el calor útil disponible.
- Reducir el deterioro del circuito de refrigeración ocasionado por corrosión y cavitación.
- Disminuir el mantenimiento y el cambio de piezas por corrosión y cavitación.

4.1 Especificaciones del refrigerante

Para la refrigeración del motor pueden utilizarse distintos fluidos refrigerantes, todos siempre dentro de las recomendaciones del fabricante.

El líquido que se introducirá en el interior del motor debe ser capaz de cumplir los requisitos del circuito calorífico. Su composición debe asegurar la absorción de calor de los elementos del grupo.

Por otra parte, ser compatible con los diferentes metales y elastómeros que se encuentran en el interior del motor, con el fin de eliminar posibles daños.

4.2 Transporte de la energía térmica

La adecuada transferencia de calor y la gestión de la temperatura es esencial para el buen funcionamiento del motor. El objetivo de todos los refrigerantes se basa en absorber el calor, transportarlo y entregarlo a otro medio o disiparlo.

La eficiencia de este ciclo dependerá de la conductividad térmica del fluido utilizado en el circuito. Esta propiedad física se refiere a la capacidad de transmitir el calor, en otras palabras, la facilidad al paso de la energía cinética de sus moléculas a otras sustancias adyacentes. Al calentarse un material sus moléculas reciben una energía cinética que incrementa su agitación.

En líquidos la conducción térmica es causada por difusión atómica o molecular. Se basa en el movimiento térmico de todas las partículas a temperatura por encima del cero absoluto. La velocidad de este movimiento es en función de la temperatura, la viscosidad del flujo y el tamaño (masa) de las partículas.

Habitualmente los refrigerantes están formados por una solución de agua (50%-75%), etilenglicol (50%-25%) e inhibidores de corrosión. Si se analiza la conductividad térmica de los fluidos por separado, se observa en la tabla 19, que esta propiedad es mucho inferior en el glicol.

Material	Conductividad térmica (W/mK)
Agua	0,58
Etilenglicol	0,25
Cobre	380
Aire	0,024
Agua + 30% etilenglicol	0,49
Agua + 50% etilenglicol	0,41

Tabla 19. Conductividad térmica de distintos materiales. (Fuente: Propia)

La operación en continuo de la planta mantiene los motores calientes aun cuando permanecen parados (de este modo está disponible el arranque cuando sea necesario). De esta forma, el refrigerante seleccionado no contiene ningún tipo de anticongelante y, por ende, tendrá una conductividad mayor debido a la ausencia de etilenglicol.

Observando la tabla de propiedades del fluido se aprecia que la densidad es mayor que la del agua (fluido utilizado hasta la fecha). Se realiza la hipótesis sobre que un aumento en la densidad influye en un menor espacio intermolecular favoreciendo la propiedad de conductividad térmica.

En la siguiente tabla número 20 se exponen las propiedades del fluido refrigerante:

Propiedades del fluido refrigerante	
Densidad	1004 kg/m ³
pH	8.1
Dureza total	<1 °dH
Concentración de inhibidor	6% volumen total
Color	incolore

Tabla 20. Propiedades del fluido refrigerante. (Fuente: Propia)

4.3 Ensayo de la eficiencia en la transmisión térmica

Para comprobar la mejora en la eficiencia térmica que presenta el fabricante del refrigerante se ha monitorizado la energía térmica que produce este circuito. Con la intención de conocer de forma instantánea el calor útil que entrega el motor utilizando este líquido.

La monitorización de esta energía ha requerido la instalación de instrumentación de medición, temperatura y caudal. La instalación de los sistemas de medición y la teoría básica para el cálculo de la energía se encuentran en el apartado anterior de monitorización de los fluidos térmicos.

4.3.1 Balance de energías

Conociendo que la energía térmica del motor no es lineal se han realizado mediciones situando el motor a diferentes porcentajes de carga. Se ha dejado que el motor se estabilice en cada punto de trabajo y se ha cogido el valor medio durante el periodo estable.

Información y condiciones del ensayo que pueden afectar en los resultados:

Día que se realiza el ensayo	26/05/2020
Hora Inicio	9:00
Hora Fin	11:00
Temperatura exterior media	20 °C
Temperatura de la sala media	30 °C
Temperatura de entrada programada para la refrigeración del motor 65° C.	65°C

Tabla 21. Condiciones iniciales de la prueba con el refrigerante (Fuente: Propia)

Se expone a continuación una tabla con los resultados extraídos del ensayo. Se estudian los regímenes de trabajo en los que el motor trabaja con normalidad. Por debajo del 50% y por encima del 95% este motor no opera, ya que hay que asegurar su buen funcionamiento.

Porcentaje de carga	Energía entregada por el motor con refrigeración mediante agua aditivada	Energía entregada por el motor con Refrigeración mediante MWM PREMIUM PROTECT
50 %	585 kW	680 kW
60 %	721 kW	750 kW
70 %	857 kW	920 kW
75%	950 kW	1020 kW
80 %	993 kW	1125 kW
85 %	1032 kW	1170 kW
90 %	1129 kW	1290 kW
95 %	1183 kW	1330 kW

Tabla 22. Comparativa energética entre los dos medios refrigerantes (Fuente: Propia).

Podemos observar un ligero aumento de la energía entregada como calor útil utilizando el refrigerante MWM PREMIUM PROTECT. Cabe remarcar que las condiciones de temperatura externa pueden afectar a los resultados.

4.3.2 Cálculo del ahorro

El estudio del cálculo del ahorro se realiza con valores del motor operando al 95%.

Aumento del aprovechamiento térmico utilizando el refrigerante de alto rendimiento:

$$1330 \text{ kW} - 1183 \text{ kW} = \mathbf{147 \text{ kW}}$$

Ahorro mensual suponiendo que el motor trabaja a una carga del 95% durante la jornada habitual (16 horas de lunes a viernes, aproximadamente 352 horas).

$$147 \text{ kW} \times 352 \text{ horas} = \mathbf{51.744 \text{ kWh}}$$

En último lugar, para encontrar el ahorro económico se plantea como si esta energía se tuviera que generar con algún otro elemento de combustión (caldera de gas, caldera de condensación, etc....). Conociendo que el precio del gas medio actual es de 0,017 €/kWh y, que el rendimiento de una caldera es del 90%, el ahorro que nos genera aprovechar más eficientemente el calor útil del motor es de:

$$\text{Ahorro} = (51.744 \text{ kWh} / 0,9) \times 0,017 \text{ €/kWh} = \mathbf{977,38 \text{ €}}$$

4.4 Estudio de la corrosión

Los motores utilizan agua descalcificada como fluido de refrigeración (producida por la planta de tratamiento de aguas de la fábrica). Este fluido cumple con los valores límite que especifica el fabricante del motor. Los valores límite que marca el fabricante se exponen en la tabla 23.

La empresa NALCO tiene la concesión de los circuitos cerrados de los motores, donde ha diseñado un tratamiento específico para estos circuitos. Los técnicos de NALCO se encargan de analizar la calidad fisicoquímica de los fluidos, además de encomendar las dosificaciones de tratamiento que requieren los circuitos para cumplir con los valores límite.

Valores límite del agua de refrigeración.

pH a 25°C	6,5 a 8,5
Contenido de iones de cloruro	Inferior a 20 mg/l
Contenido de iones de sulfato	Máximo 100 mg/l
Dureza total	Inferior a 1ºdH
Parte de dureza carbonatada en la dureza total	Inferior a 1ºdH
Conductividad eléctrica	Inferior a 0,1 mS/cm
Oxígeno (O ₂)	Inferior a 0,05 mg/l
Cloruro	Inferior a 20 mg/l
Total de hierro (Fe)	Inferior a 0,05 mg/l
alcalinotérreos	Inferior a 0,02 mg/l
Dureza total	Inferior a 0,1 ºdH

Tabla 23. Valores límite del agua de refrigeración (Fuente: Propia)

El producto de tratamiento es TRAC100, un inhibidor de corrosión e incrustación usado especialmente en circuitos cerrados de alta temperatura.

Los resultados de las analíticas mensuales son aceptables. Utilizando este tratamiento se consigue estabilizar las propiedades del agua.

4.4.1 Ensayos de corrosión mediante testigos de corrosión

Con la intención de verificar la mejora en la corrosión con el nuevo refrigerante se plantean una serie de ensayos. Primeramente, experimentando la corrosión en el circuito mediante agua descalcificada y usando el tratamiento de NALCO. Posteriormente, con el refrigerante.

Entonces se decide realizar un ensayo de velocidad de corrosión. El ensayo se lleva a cabo mediante la instalación de una probeta metálica del material el cual se quiere analizar su corrosión. Esta técnica se basa en la pérdida de peso del testigo al exponerse durante un cierto período de tiempo en el medio a analizar. La diferencia de pérdida de peso antes y después de la aplicación se convierte en una ratio de corrosión.

Estas probetas metálicas comúnmente reciben el nombre de testigos o cupones de corrosión.

Los cupones de corrosión es una técnica económica y efectiva para monitorear la corrosión en circuitos.

El ensayo no precisa de equipos o procedimientos complejos. Simplemente se debe estudiar el cupón más apropiado para el circuito y realizar un montaje para introducirlo dentro del sistema a analizar.

4.4.1.1 Fundamentos de los testigos de corrosión

Los testigos que se introducen en el sistema deben ser elegidos adecuadamente para obtener unos resultados representativos. Los cupones son fabricados de aleaciones específicas que, se les aplica una preparación inicial de la superficie antes de la exposición. El acondicionamiento inicial es de gran importancia para obtener unos resultados satisfactorios.

Dependiendo de la aplicación, el método de acabado superficial puede variar. Por otro lado, es común para todos, la limpieza de los especímenes antes de ser pesados y expuestos para remover de posibles contaminantes que harían que la prueba no fuera válida.

La preparación de la superficie provoca que inicialmente el cupón sea altamente susceptible a la corrosión, puesto que la superficie del metal está en un estado activo. Con un periodo de exposición inferior a 30 días se obtendría unos resultados no representativos. Comúnmente se han establecido periodos de 30, 60 o 90 días. Cuanto más se alargue la exposición del cupón en el interior del medio a evaluar menor será la velocidad promedia de corrosión y, por ende, será más cercana a las condiciones reales en el interior del motor.

Una vez, pasado el tiempo razonable de exposición se retira el cupón. Consecutivamente, se pasa al limpiado de la superficie, eliminando todos los contaminantes que quedan en la superficie y productos secundarios de la corrosión. Entonces, está listo para volver a ser pesado. Llegado a este punto ya se puede saber la pérdida de peso que ha sufrido.

El posicionamiento y la orientación del testigo tiene gran importancia. Se recomienda que se instale paralelamente al sentido del flujo y a contracorriente. De tal modo, que experimenten las mismas condiciones que las paredes de los conductos y los componentes del motor. Se sujetarán firmemente mediante porta-cupones, es el elemento que se encargará que la probeta quede en la posición deseada en el interior del circuito. El material del porta-cupones no puede ser metálico para no crear una corrosión galvánica. De la misma manera el tornillo que agarra el testigo contra el porta-cupones tampoco puede ser metálico.

Es imprescindible conocer las medidas de los testigos para poder calcular el área que ha estado en contacto con el medio refrigerante. Se requiere el valor de la superficie de exposición para obtener el ratio de corrosión.

Mediante la pérdida de peso se calculan el ratio de corrosión y la pérdida de espesor.

1. Cálculo de la pérdida de la tarifa de corrosión por peso:

$$T_c [\text{Mils por año}] = \frac{W \cdot 393,7 \cdot 365}{A \cdot \rho \cdot D} \quad [18]$$

2. Cálculo de la pérdida de espesor del metal:

$$P_e [\text{Mils}] = \frac{W \cdot 393,7}{A \cdot \rho} \quad [19]$$

Donde:

T_c	Tarifa de corrosión (Mils por año)
P_e	Perdida de espesor (Mils)
W	Perdida de peso (g)
A	Área cupón (cm^2)
ρ	Densidad aleación (g/cm^3)
D	Días de exposición

Tabla 24. Parámetros de ecuaciones de pérdida de tarifa de cupones (Fuente: Propia)

4.4.2 Aplicación del ensayo de cupones en el motor

El ensayo comienza identificando los materiales de los componentes que están en contacto con el fluido de refrigeración. Concretamente, para el motor a estudiar las zonas por donde circula el fluido de refrigeración están compuestas por hierro fundido (bloque, culatas, camisas, chaquetas, conductos) y cobre (intercoolers).

Conociendo los materiales del motor se mantiene una reunión con la técnica de campo de NALCO. Donde con su experiencia se acuerda la elección de un cupón de mild steel (acero suave) para ensayar la velocidad de corrosión en el hierro fundido y, otro cupón de cobre para ensayar la corrosión en los intercoolers (compuestos por cobre).



Figura 44. Cupón de cobre y Acero suave (Fuente: Propia)

Conociendo el requisito que debe cumplir los porta-cupones y, que en el circuito donde se va a introducir está entorno a los 85°C, se ha optado por un porta-cupones de teflón. Dentro de sus propiedades resalta como gran aislante a corrientes eléctricas y soportar temperaturas en el rango de -270°C hasta 270°C, manteniendo todas sus cualidades.

Mediante un taller subcontratado se ha solicitado el mecanizado de los porta-cupones. Fabricados mediante torno a partir de piezas macizas de teflón. El diseño solicitado se muestra en la figura 45. En el diseño se puede apreciar la rosca para poder ser roscado en el rack y el espacio plano que dispone para sujetar el cupón.

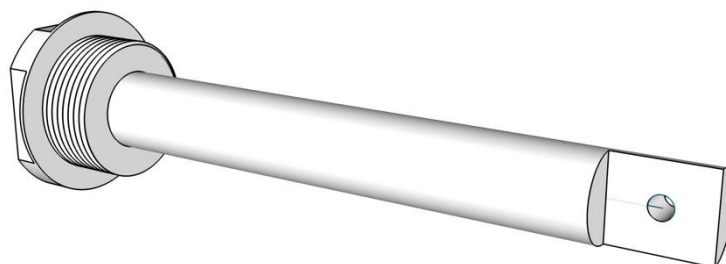


Figura 45. Diseño del porta-cupones de teflón fabricado (Fuente: Propia)

Para poder instalar los cupones de corrosión se ha diseñado un denominado rack de corrosión, lugar donde van instalados los cupones mediante los porta-cupones.

Cabe remarcar que cuando se va a examinar la corrosión de dos cupones diferentes, hay que vigilar la posición con la que se instalan. En el caso de esta aplicación primeramente en la dirección del flujo se tiene que instalar el de acero suave y, posteriormente, el de cobre.

Debido a la importancia de la posición de los cupones, antes de diseñarlo se comprobó cual sería el sentido del fluido en el rack. El conducto inferior trabaja a una presión de 3 Bar, mientras que el conducto superior a 2 Bar, de este modo la dirección del caudal será de abajo hacia arriba.

Con esta información y conociendo la correcta posición de los cupones se ha diseñado el rack que se observa en la figura 46. Se ha fabricado con tubo de 2 pulgadas de acero inoxidable. Como características, dispone de manguitos con rosca interna para poder roscar los porta-cupones, dos válvulas de bola a cada extremo y un latiguillo flexible para absorber las vibraciones del motor.

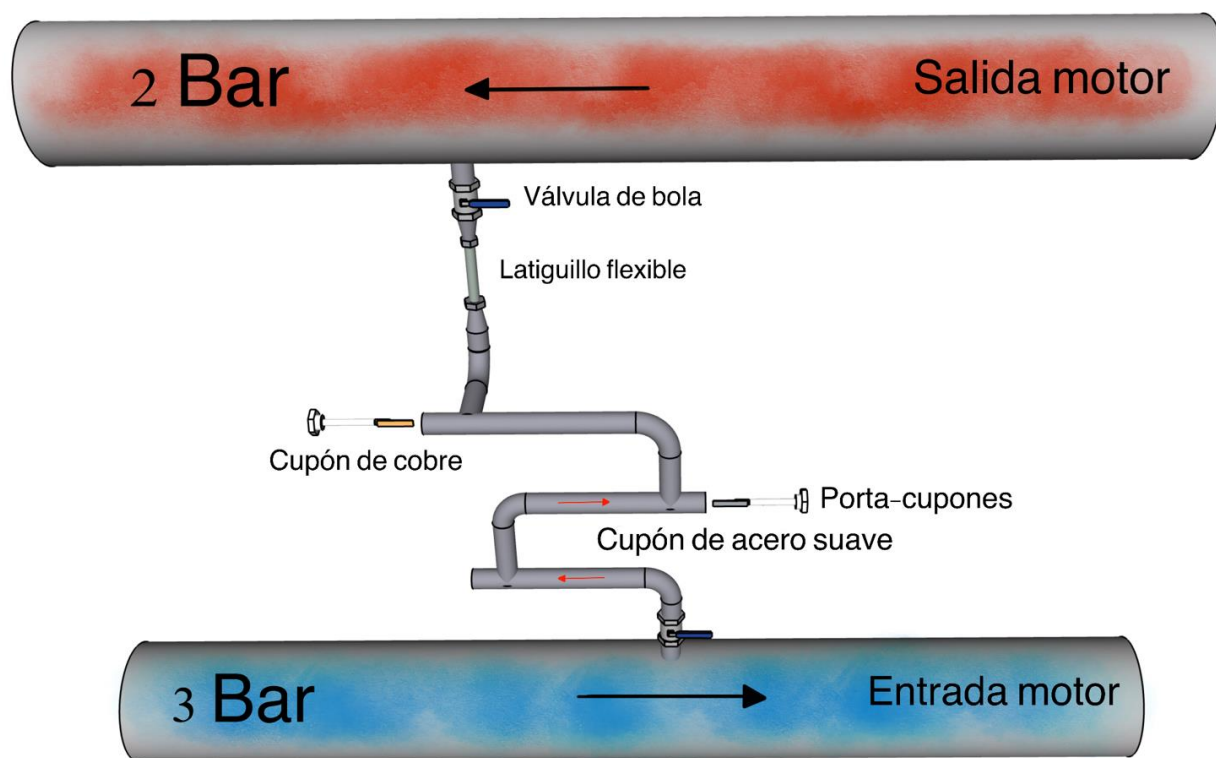


Figura 46. Diseño del rack de corrosión fabricado para el circuito de refrigeración del motor (Fuente: Propia)

No ha sido necesario realizar orificios en los conductos generales, ya que se ha aprovechado unos picajes existentes que no se utilizaban.

Este circuito secundario (rack) se puede aislar del circuito general cerrando las válvulas de bola de cada extremo. Esto supone una ventaja en el momento de insertar o extraer los cupones, puesto que no hay necesidad de parar el motor ni vaciar el circuito principal.

En último lugar, con el objetivo de no crear una falsa corrosión en los cupones, estos se han afirmado mediante tornillos de plástico.

Siguiendo el diseño anteriormente presentado, se sueldan diferentes figuras de acero inoxidable (reducciones, codos, Tés, manguitos, manguitos de rosca loca hexagonal y tubos) obteniendo el resultado que se observa en la figura 47.



Figura 47. Resultado del diseño del rack de corrosión (Fuente: Propia)

En la figura 48, se muestra el rack de corrosión en el momento de la instalación.



Figura 48. Instalación del rack de corrosión (Fuente: Propia)

4.4.3 Primera parte del ensayo con agua

El día 29 de noviembre de 2019 se insertan los dos cupones en el rack. Tras pasar el periodo de exposición se retiran el 29 de febrero. En total han permanecido 92 días dentro del circuito, un periodo razonable para obtener un ratio de corrosión aceptable.

Una vez extraídos del sistema tienen el aspecto que se observa en la figura 49, a primera vista se observa que el cupón de cobre tiene suciedad, pero está bastante bien. Por otro lado, el cupón de acero está totalmente ennegrecido y con síntomas de corrosión.



Figura 49. Primer aspecto al retirar los cupones (Fuente: Propia)

Como se puede ver en la figura ampliada 50, hay síntomas de una corrosión por picaduras (pitting). Es una forma de corrosión localizada que conduce a la creación de pequeñas muescas o hoyos en el metal. Este tipo de corrosión puede disminuir el espesor de las paredes del sistema de refrigeración.



Figura 50. Vista ampliada del cupón de acero (Fuente: Propia)

4.4.4 Resultados primer ensayo

Sin manipular los cupones con las manos se introducen en un sobre con todos los datos de la instalación y el periodo de exposición. Se envían al laboratorio de NALCO ubicado en Holanda para su análisis. En el laboratorio serán limpiados de la suciedad adecuadamente y pesados para obtener la pérdida de peso de cada uno.

A continuación, se presenta en la tabla 25 los datos más relevantes y los resultados del laboratorio del análisis de la corrosión del cobre.

ANÁLISIS DE CORROSIÓN EN EL COBRE	
INFORMACIÓN DEL SISTEMA	
Programa de tratamiento	TRAC 100
INFORMACIÓN DEL CUPÓN	
Metalurgia del cupón	Cobre
Tamaño Probeta	76 x 12,7 x 1,6 mm
Número de serie probeta	C29774
PERIODO DE EXPOSICIÓN	
Fecha instalación	29-nov-2019
Fecha retirada	29-feb-2020
PERDIDA DE PESO	
Peso inicial	11,7745 g
Peso final	11,7685 g
Pérdida de peso total	0,006 g
RESULTADO DE LA CORROSIÓN	
Tipo de corrosión	Ninguna, el cupón no presenta corrosión apreciable o medible.
Pérdida de la tarifa de corrosión por Peso (T_c)	0,0472 Mils por año
Profundidad de pérdida de metal (P_e)	0,011 Mils

Tabla 25. Valores del análisis de la corrosión en cobre (Fuente: Propia)

Comentarios del laboratorio:

El resultado del cupón de cobre es correcto. La pérdida de la tarifa de corrosión por peso debe ser inferior a una milésima por año (<1 mpy).

Aplicando el mismo procedimiento para el cupón de hierro, se presenta en la tabla 26 los datos más relevantes y los resultados del laboratorio.

ANÁLISIS DE CORROSIÓN EN EL HIERRO	
INFORMACIÓN DEL SISTEMA	
Programa de tratamiento	TRAC 100
INFORMACIÓN DEL CUPÓN	
Metalurgia del cupón	Acero suave
Tamaño Probeta	76 x 12,7 x 1,6 mm
Número de serie probeta	N90388
PERIODO DE EXPOSICIÓN	
Fecha instalación	29-nov-2019
Fecha retirada	29-feb-2020
PERDIDA DE PESO	
Peso inicial	10,5415 g
Peso final	10,4684 g
Pérdida de peso total	0,0731 g
RESULTADO DE LA CORROSIÓN	
Tipo de corrosión	Corrosión localizada en el metal. Perdida que ocurre en sitios discretos de la superficie, tal como hoyos, depresiones o áreas confinadas.
Perdida de la tarifa de corrosión por Peso (T_c)	0,7 Mils por año
Profundidad de pérdida de metal (P_e)	0,178 Mils

Tabla 26. Valores del análisis de la corrosión en cobre (Fuente: Propia)

Comentarios del laboratorio:

Como se observó en la extracción del cupón se observa pequeños poros (pitting) en la superficie, aun así, el resultado está dentro de los valores de buena protección frente a la corrosión, es inferior a una milésima por año (<1mpy).

4.4.4.1 Cálculos de los ratios de corrosión

Aplicando la ecuación 18 se obtiene la tarifa de corrosión para el cobre:

$$T_c = \frac{0,006 \cdot 393,7 \cdot 365}{22,1424 \cdot 8,96 \cdot 92}$$

$$T_c = 0,0472 \text{ Mils por año}$$

Aplicando la ecuación 19 se obtiene la profundidad de pérdida para el cobre:

$$P_e = \frac{0,006 \cdot 393,7}{22,1424 \cdot 8,96}$$

$$P_e = 0,011 \text{ Mils}$$

Área superficie cupón en contacto con el fluido refrigerante	22,1424 cm ²
Densidad del cupón de cobre	8,96 g/cm ³
Pérdida de peso	0,006 g
Días exposición	92 días

Tabla 27. Resultados cupón cobre (Fuente: Propia)

Aplicando la ecuación 18 se obtiene la tarifa de corrosión para el hierro:

$$T_c = \frac{0,0731 \cdot 393,7 \cdot 365}{22,1424 \cdot 7,3 \cdot 92}$$

$$T_c = 0,6968 \cong 0,7 \text{ Mils por año}$$

Aplicando la ecuación 19 se obtiene la profundidad de pérdida para el hierro:

$$P_e = \frac{0,0731 \cdot 393,7}{22,1424 \cdot 7,3}$$

$$P_e = 0,178 \text{ Mils}$$

Área superficie cupón en contacto con el fluido refrigerante	22,1424 cm ²
Densidad del cupón de acero suave	7,3 g/cm ³
Pérdida de peso	0,0731 g
Días exposición	92 días

Tabla 28. Resultados cupón acero (Fuente: Propia)

4.4.5 Segunda parte del ensayo con refrigerante

En esta segunda parte del ensayo se introduce el refrigerante en el motor y se introducen unos nuevos cupones de corrosión.

El 3 de marzo de 2020 empezó el overhaul para este motor, así que hasta el 27 de marzo no se incorporó el refrigerante. Por otro lado, surgieron problemas derivados del mantenimiento y, la puesta en marcha definitiva no se realizó hasta finales de abril.

Teniendo en cuenta que el motor ha estado parado mientras se arreglaban los problemas, se decidió no introducir los cupones para no falsear los resultados. Hasta finales de Julio, momento en el cual se retirarán los cupones, no se tendrán los resultados finales de este ensayo.

4.4.5.1 Seguimiento de las propiedades del refrigerante MWM PREMIUM PROTECT

Todos los circuitos cerrados de refrigeración se analizan quincenalmente por los técnicos de NALCO. En este circuito se realiza de la misma manera, pero de momento por los técnicos de cogeneración.

Hasta la fecha se han realizado varios análisis para comprobar que el refrigerante mantiene sus propiedades. Concretamente, se ha analizado el pH y la dureza. Los resultados obtenidos son muy similares a las propiedades iniciales del fluido. No se aprecia ningún deterioro en el estado del refrigerante.

Capítulo 5. Análisis de los gases de combustión

La composición de los gases de la combustión proporciona una información de importante valor. El análisis permite conocer las proporciones de contaminantes que se encuentran en los gases. Si se interpretan adecuadamente ayudan a comprender el estado de funcionamiento del motor, puesto que aporta una idea de la forma en que se produce la combustión.

El análisis de los gases se podría definir como una técnica predictiva que permite saber como se lleva a cabo la combustión y, por tanto, el estado del motor. Con esta información se pueden tomar decisiones sobre posibles ajustes para mejorar la combustión. Por otro lado, también se pueden detectar otras anomalías que no dependen de los ajustes del motor, como por ejemplo si en la cámara de combustión existe la posibilidad de que se filtre aceite o agua debido algún fallo mecánico.

Teniendo en cuenta que el motor que se analiza consume gas natural la mayoritaria composición de las emisiones serán los siguientes compuestos gaseosos:

- CO
- O₂
- CO₂
- NO, NO₂, NO_x

La medición de la concentración de estos gases es con la finalidad de dos importantes factores:

- Garantizar el correcto funcionamiento de la máquina en lo que se refiere a la combustión y, mantener estables los niveles de eficiencia para garantizar la rentabilidad del grupo.
- Certificar el cumplimiento de la normativa medioambiental que se aplica en la planta de cogeneración.

5.1 Generalidades de los contaminantes

En motores de gas natural los parámetros en los cuales se debe prestar mayor atención tanto para el buen funcionamiento como para el cumplimiento de la normativa son el O_2 , CO y NOx. Con estos parámetros se puede realizar un estudio bastante completo del estado del motor.

Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno denominados de forma genérica NOx, son formados de manera usual por monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂).

El monóxido nítrico, se caracteriza por ser un gas incoloro y ligeramente tóxico. La formación de NO a temperatura ambiente es insignificante, pero incrementa rápidamente con la temperatura.

Por otro lado, el dióxido de nitrógeno es un gas amarillento y con una toxicidad elevada. La concentración de NO₂ depende significativamente de la temperatura.

Un valor de O_2 elevado provoca la disminución de la temperatura de la cámara de combustión y, de este modo también se reduce la proporción de NOx.

Un máximo valor de NOx es igual a una mayor eficacia mecánica. Los motores de mezcla pobre consiguen mayores niveles de eficiencia a potencias elevadas y temperaturas altas. Estos dos factores incrementan la proporción de NOx.

Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un gas tóxico incoloro e inodoro, resultado de la oxidación incompleta del carbono durante el proceso de combustión.

En procesos de combustión con un exceso de oxígeno provocan que las moléculas de CO reaccionen con O_2 a CO₂.

5.2 Valores base de emisiones

En la tabla 29 se muestran los datos que proporciona el fabricante del motor sobre las emisiones teóricas de diseño. Estos valores parten de condiciones ideales que en la realidad siempre serán algo distintas. La latitud de la planta, la presión atmosférica, la calidad del gas entre otros parámetros, son las principales causas que pueden influir en las emisiones.

En la misma tabla se pueden ver los resultados obtenidos en la puesta en marcha, estos valores son los que se recogieron en el acta después de instalar el motor en las instalaciones de Guissona en el año 2005. No varían demasiado con respecto a las emisiones de diseño.

VALORES DE EMISIONES	
Valores de emisiones según diseño de fabricante	
O ₂	9%
NOx	820 mg/Nm ³
CO	650 mg/Nm ³
Valores de emisiones puesta en marcha	
O ₂	9,11%
NOx	863,73 mg / Nm ³
CO	743,33 mg / Nm ³

Tabla 29. Valores de emisiones de diseño y puesta en marcha (Fuente: Propia)

5.3 Normativa sobre emisiones contaminantes

El complejo industrial "LA CLOSA" tiene otorgada una autorización ambiental por la Generalitat de Catalunya, por ser una factoría de grandes dimensiones y albergar múltiples actividades industriales. En esta se declara todas las actividades que se llevan a cabo en el complejo, con el propósito de documentar según la ley existente todas las prevenciones y controles ambientales que deben cumplir para cada una de las actividades industriales.

De acuerdo con lo establecido por la autorización medioambiental, para los focos de emisión de los motores de gas natural, se fijan los siguientes límites para la prevención de la contaminación atmosférica:

Motores de gas natural		
Contaminante	Valor límite (mg/Nm ³) hasta el 31/12/2024	Valor límite (mg/Nm ³) a partir del 01/01/2025
CO	1000	1000
NOx	1500	190

Tabla 30. Valores límite de emisiones (Fuente: Propia)

Los límites de emisiones deben ser referidos a las siguientes condiciones de medida:

- Temperatura = 273K
- Presión de humos = 101,3 kPa
- Oxígeno de referencia = 5%

La administración aplica en la actualidad un real decreto de 1975. En vista de la pronta aplicación de la nueva legislación se valora más oportuno estudiar la nueva normativa.

Las nuevas limitaciones se recogen en el Real Decreto 1042 de 2017. Esta normativa trata sobre la limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión medianas.

En el artículo 1 de este documento se dispone:

"Real decreto 1042/2017: El objeto de este real decreto se basa en establecer los límites para controlar las emisiones a la atmosfera de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y partículas procedentes de las instalaciones de combustión medianas y, así reducir las emisiones atmosféricas y los riesgos potenciales de esas emisiones para la salud humana y el medio ambiente. (2017, artículo 1, Sec. 1 Pág 127842)"

En el artículo 2 habla sobre el ámbito de aplicación. A continuación, se muestra el fragmento por el cual las instalaciones de cogeneración de BonArea deben cumplir este real decreto:

" Real decreto 1042/2017: Este real decreto será de aplicación a todas las instalaciones de combustión con una potencia térmica nominal igual o superior a 1 MW e inferior a 50 MW («instalaciones de combustión medianas») cualquiera que sea el combustible utilizado, ya sean de titularidad pública o privada. (2017, artículo 2, Sec. 1 Pág 127843)"

En el artículo 6 se desarrollan las competencias que las comunidades autónomas tienen para adaptar este real decreto a su territorio.

Finalmente, en el anexo II, se marcan los valores límite para instalaciones de combustión medianas, donde:

" Real decreto 1042/2017: Todos los valores límite de emisión indicados en el presente anexo están determinados a una temperatura de 273,15,15 K, una presión de 101,3 kPa, previa corrección del contenido en vapor de agua de los gases residuales, y un contenido normalizado de O₂ del 6 % en el caso de las instalaciones de combustión medianas que utilicen combustibles sólidos, del 3 % en el de las instalaciones de combustión medianas, distintas de los motores y las turbinas de gas, que usen combustibles líquidos y gaseosos y del 15 % en el de los motores y las turbinas de gas. (2017, artículo 2, Sec. 1 Pág 127859)"

Valores límite de emisión (mg/Nm³) para los motores y las turbinas de gas existentes

Contaminante	Tipo de instalación de combustión mediana	Gasóleo	Combustibles líquidos distintos del gasóleo	Gas natural	Combustibles gaseosos distintos del gas natural
SO ₂	Motores y turbinas de gas	—	120	—	15 ⁽¹⁾ ⁽²⁾
NO _x	Motores	190 ⁽³⁾ ⁽⁴⁾	190 ⁽³⁾ ⁽⁵⁾	190 ⁽⁶⁾	190 ⁽⁶⁾
	Turbinas de gas ⁽¹⁷⁾	200	200	150	200
Partículas	Motores y turbinas de gas	—	10 ⁽⁸⁾	—	—

Tabla 31. Valores límite de emisiones [21]

Entonces, a modo de resumen, este Real Decreto pretende sentar las bases para las limitaciones de las emisiones en las instalaciones de combustión. Dando autoridad a las comunidades para que partir de esta desarrolle su legislación. De ahí la autorización ambiental que la Generalitat ha aprobado para el complejo "LA CLOSA".

5.4 Claves para la interpretación de los análisis

En este apartado se exponen los principales factores que pueden afectar a la composición de las emisiones de CO y NOx.

El CO se comportará de diferente manera dependiendo el estado del motor. Es un parámetro que no se puede regular mediante posibles ajustes en la combustión del grupo. El subir o bajar las temperaturas de las cámaras o el ángulo de encendido no causará efecto significativo en las emisiones de CO. Esto se comprueba en todas las analíticas realizadas en la planta variando las condiciones de trabajo.

Este parámetro depende directamente del estado mecánico del motor. Es verdaderamente inalcanzable alguna mejora sin modificar el diseño del motor o introducir algún tipo implementación tecnológica.

Algunos ejemplos que pueden afectar a la creación de este compuesto gaseoso serían:

- Micro-fugas de aceite en las válvulas de culata creadas a lo largo de la vida útil del motor.
- Problemas con el sistema de encendido.
- La quema de aceite debido al desgaste de los aros o otras posibles causas.
- El funcionamiento defectuoso de algunas de las bujías.
- La calidad del gas.

De forma contraria los valores de NOx se verán afectados por la mayoría de los ajustes que se realicen en el motor. Como se explica anteriormente, la temperatura de combustión está relacionada con la cantidad de gases NOx. A temperaturas más altas donde se consiguen los rendimientos eléctricos más elevados los óxidos de nitrógeno también tendrán tendencia a subir.

En este motor es posible ajustar la temperatura de las cámaras de combustión mediante las denominadas curvas características de temperatura. Estas curvas incrementan la temperatura de las cámaras a medida que la potencia del motor incrementa. El motor ajustará la proporción aire-gas hasta llegar a la temperatura que la curva le indica que debe llegar para esa determinada potencia.

Unos niveles elevados de NOx se pueden interpretar como una temperatura elevada en las curvas. Se pueden reducir estas emisiones bajando las temperaturas de las curvas. Este fenómeno se puede corroborar en las analíticas que más adelante se muestran.

5.5 Aplicación de análisis de humos en el motor

El control de las emisiones resulta imprescindible si se quiere evaluar el rendimiento y el funcionamiento del motor. Tras estudiar la posibilidad de esta aplicación se decide que, por la sencillez de ejecución y por el precio no muy elevado del equipo aportará una valiosa información. Ayudará en el mantenimiento de los motores y para el estudio del proyecto.

Para llevar a cabo este objetivo se ha realizado la compra de un analizador de humos industrial. Se compone por analizador portátil de TESTO, concretamente el modelo 340. Este dispositivo dispone de 4 sensores para la medición de O_2 , CO, NO_x , SO_2 . Sencillamente se introduce la sonda en el interior del conducto de humos y, mediante una bomba de aire integrada en el sistema hace pasar los gases por los diferentes sensores. El módulo de análisis de resultados interpreta y muestra los resultados de la medición.

Por otro lado, se ha practicado un punto de acceso en el conducto de humos del motor para poder introducir la sonda.



Figura 51. Medición de los gases de escape (Fuente: Propia)

Se ha configurado el dispositivo atendiendo a las necesidades para comprender el estado de la combustión y la eficiencia del motor. Para el debido seguimiento se realizará el control de los siguientes parámetros:

- Temperatura humos de escape.
- Porcentaje de O_2
- Cantidad de CO en mg / Nm³
- Porcentaje de CO_2
- Cantidad de NO en mg / Nm³
- Cantidad de NO₂ en mg / Nm³
- Cantidad de NO_x en mg / Nm³

5.6 Análisis de humos

En el mes de marzo de 2020 el motor se sometió al mantenimiento que le correspondía por cumplir las 65.000 horas. Con el objetivo de investigar los posibles cambios en las emisiones se realizan análisis antes y después del mantenimiento para poder estudiar y comparar los resultados. Con estos datos reales se apreciará la importancia de los mantenimientos preventivos y como afectan en el funcionamiento del motor.

Posteriormente, después de la instalación de las bujías de segunda generación se volverán a realizar estudios de emisiones. Como se explica en el apartado del upgrade en bujías, estas funcionan un tanto diferente con lo que la combustión será algo distinta y, esto tendrá un efecto directo en los gases de escape.

Una vez instaladas las bujías se realizarán una serie de ajustes en el motor con el objetivo de incrementar el rendimiento del motor. Estos requieren de forma imprescindible de mediciones de los humos para conocer cómo se desarrolla la combustión con los cambios realizados.

Las emisiones fluctúan dependiendo del régimen de trabajo del motor. La mejor forma para obtener unos resultados representativos y comparables es marcando unas pautas para tomar todas las mediciones. Se establece que todas las analíticas de humos se realizarán con el motor trabajando al 95% de su potencia máxima de forma fija. Además, se dejará un periodo para que se estabilice en ese punto de trabajo.

También será indispensable anotar el ángulo de encendido y las temperaturas de las curvas características en las que el motor trabaja.

Todas analíticas se realizan con un oxígeno de referencia del 5%. Esto se debe a que la concentración de gases varía en relación con el porcentaje de oxígeno. Por ello, se debe tener una referencia. Coincidiendo el mismo oxígeno de referencia para la normativa que aplica la Generalitat y, el que usa el fabricante, se realizan con la misma referencia.

Con el instrumento de medición que se utiliza (TESTO 340) no se tiene que realizar ningún tipo de cálculo para referenciar las mediciones al oxígeno determinado, puesto que simplemente se configura para la referencia de oxígeno que se quiere. Si no se tiene la opción de hacerlo automáticamente se puede calcular del siguiente modo:

$$NO_x \left[\frac{mg}{m^3} \right] = \frac{21\% - O2_{ref}}{21\% - O2_{medición}} \quad [20]$$

El $O2_{ref}$ es el valor de oxígeno al cual se quiere referir la muestra y, el $O2_{medición}$ el obtenido en la medición. Esta ecuación también es válida para el CO.

5.6.1 Análisis de emisiones antes del mantenimiento

En el mes de febrero justo antes del mantenimiento se realiza una analítica y se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 32.

El porcentaje de oxígeno es el correcto, indicando que la mezcla de gas-aire se realiza correctamente. Si el valor fuera superior significaría que la mezcla es demasiado pobre (exceso de aire).

En el grupo de los óxidos de nitrógeno expresado como NOx se obtiene un resultado alto. Para reducir este parámetro hay que bajar las curvas características de temperatura de cámaras de combustión. Cabe remarcar que si se bajan las temperaturas de las cámaras se perderá eficiencia en el grupo.

Las mediciones que se obtienen de monóxido de carbono son correctas, con lo que se reafirma que la mezcla se realiza adecuadamente, no se quema aceite en exceso y la combustión se completa perfectamente.

Como valoración general el motor trabajaba con un buen rendimiento mecánico y, con una buena eficiencia del combustible, aunque con unos valores levemente altos de NOx. Todos los parámetros cumplen con la normativa medioambiental que se le aplica a la planta de cogeneración. Debido a que el mantenimiento empezaba el 1 de marzo de 2020 no se tomó ninguna medida, ya que no se consideró necesario.

Fecha del análisis:	25 / 02 / 2020
Combustible	Gas Natural
Angulo de encendido	25 °
Temperatura Curvas características	310 / 309 °C
Horas motor	66.427 horas
Régimen de carga	95% (3580 kW)
Temperatura gases combustión	475,3 °C
Medición del porcentaje de O₂	9,04 %
Medición del porcentaje de CO₂	6,75 %
Medición de CO	696 mg / m3
Medición NO	783 mg / m3
Medición NO2	234 mg / m3
Medición NOx	1432 mg / m3

Tabla 32. Valores del análisis de emisiones antes del mantenimiento (Fuente: Propia)

5.6.2 Análisis de emisiones después del mantenimiento

Finalizado el mantenimiento se deja el motor durante aproximadamente una semana funcionando en un régimen de carga elevado (90% - 95%). Esto con la intención de que los nuevos componentes (pistón, aros, válvulas, etc....) se asienten correctamente.

Transcurrido el periodo inicial de rodaje se realiza un análisis de los gases de combustión. Para observar la diferencia entre los dos escenarios no se manipula ningún parámetro de la configuración de la combustión.

Los valores que se recogen son los que se muestran en la tabla 33. El análisis se realiza en las mismas condiciones de carga para obtener unos resultados que se puedan comparar.

Analizando los datos, las temperaturas de gases se mantienen en la misma línea. Sucede el mismo comportamiento para el porcentaje de O_2 , CO_2 y CO . Todos estos parámetros están dentro del buen funcionamiento del motor.

Por otro lado, se obtiene una bajada drástica de los óxidos de nitrógeno. En este punto se puede comprobar el beneficio de realizar el mantenimiento del motor. Esta bajada denota que ha recuperado el rendimiento mecánico y, que se pueden aumentar las temperaturas características de las cámaras de combustión. Los bajos valores de NO_x permiten aumentar las temperaturas para conseguir incrementar la eficiencia mecánica del motor.

No se aplica ningún ajuste, ya que primero se instalarán las nuevas bujías de alto rendimiento y se volverá a realizar un análisis para observar los posibles cambios en las emisiones.

Tabla 33. Valores del análisis de emisiones después del mantenimiento (Fuente: Propia)

Fecha del análisis:	07 / 05 / 2020
Combustible	Gas Natural
Angulo de encendido	25 °
Temperatura Curvas características	310 / 309 °C
Horas motor	66.687 horas
Régimen de carga	95% (3580 kW)
Temperatura gases combustión	477,3 °C
Medición del porcentaje de O_2	9,14 %
Medición del porcentaje de CO_2	6,69 %
Medición de CO	690 mg / m ³
Medición NO	367 mg / m ³
Medición NO_2	158 mg / m ³
Medición NO_x	719,1 mg / m ³

5.6.3 Análisis de emisiones con bujías de segunda generación

Siguiendo el plan de mantenimiento del motor, pasadas 300 horas del overhaul se debe realizar el reglaje del motor. Momento donde se aprovecha el parcial desmontaje para instalar las nuevas bujías de segunda generación.

Sin tocar ningún ajuste del motor se vuelven a examinar los humos de combustión en las mismas condiciones de carga.

El primer cambio significativo es la temperatura de los gases de escape, han experimentado una bajada en la temperatura de alrededor de 18-20°C. Esto indica que se está aprovechando más energía en el interior del cilindro, en forma de energía mecánica.

El aumento del porcentaje de O_2 también denota un funcionamiento distinto, ya que en normalidad de trabajo se mantiene muy cercano al 9%. El aumento de este parámetro sugiere que se puede realizar una mezcla un poco más rica para llegar a una combustión estequiométrica.

Por otro lado, las emisiones de CO, CO₂, NO_x se mantienen en valores muy parecidos.

Con esta analítica se verifica que las bujías de segunda generación están diseñadas para trabajar en condiciones diferentes en comparación con las habituales.

El próximo paso consistirá en ajustar el motor de modo que se cumplan dos objetivos:

- Conseguir el supuesto aumento en el rendimiento que deben proporcionar las nuevas bujías.
- Alcanzar los niveles de emisiones correctos tanto de buen funcionamiento del equipo como asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental.

Tabla 34. Valores del análisis de emisiones con las nuevas bujías (Fuente: Propia)

Fecha del análisis:	11 / 05 / 2020
Combustible	Gas Natural
Angulo de encendido	25 °
Temperatura Curvas características	310 / 309 °C
Horas motor	66.695 horas
Régimen de carga	95% (3580 kW)
Temperatura gases combustión	459,5 °C
Medición del porcentaje de O_2	9,48 %
Medición del porcentaje de CO_2	6,50 %
Medición de CO	675 mg / m ³
Medición NO	365 mg / m ³
Medición NO ₂	194 mg / m ³
Medición NO _x	751,7 mg / m ³

5.6.4 Análisis de emisiones finales con los ajustes correctos

El último paso de esta prueba de campo es ajustar debidamente el motor con las bujías de segunda generación. Se busca aumentar el rendimiento y a la vez garantizar estar por debajo de los límites en emisiones. Los resultados de las pruebas de rendimiento se exponen en el apartado del upgrade en bujías.

Estudiando las anteriores analíticas se decide subir la temperatura de las curvas características. El valor de NOx se mantiene en unos valores bajos que permiten subir la temperatura de las cámaras de combustión con lo que aumentará el rendimiento. Cabe remarcar que a la vez también subirán las emisiones en NOx.

Se realiza el ajuste de forma progresiva y analizando los humos en cada ajuste. Primeramente, se suben las temperaturas de las curvas características de 310°C a 320°C. El ángulo de encendido se decide no tocarlo. El fabricante expone que el ángulo de encendido óptimo para este motor tanto para el funcionamiento como para el rendimiento es de 25°.

En este ajuste intermedio se realiza una analítica que se muestra a continuación mediante la tabla 35. El cambio más significativo y esperado es el aumento de los NOx. Lógicamente al aumentar la temperatura de la combustión se comprueba la teoría del aumento de los NOx. Por otra parte, se esperaba que la temperatura de humos incrementará, pero se obtienen unos resultados prácticamente iguales.

En referencia al CO, aunque en comparación con la anterior analítica tenemos un leve incremento, es debido a la fluctuación de las mediciones del analizador, ya que no se mantienen constantes en un valor fijo.

Tabla 35. Valores del análisis de emisiones con primeros ajustes (Fuente: Propia)

Fecha del análisis:	12 / 05 / 2020
Combustible	Gas Natural
Angulo de encendido	25 °
Temperatura Curvas características	320 / 319 °C
Horas motor	66.713 horas
Régimen de carga	95% (3580 kW)
Temperatura gases combustión	459,3 °C
Medición del porcentaje de O₂	9,75 %
Medición del porcentaje de CO₂	2,68 %
Medición de CO	714 mg / m ³
Medición NO	851 mg / m ³
Medición NO ₂	196,7 mg / m ³
Medición NOx	1048 mg / m ³

Tras realizar el primer ajuste y estudiar los valores de las emisiones obtenidos se decide realizar un segundo ajuste. Aún se tiene un cierto margen seguro para cumplir con la normativa. Recordando que el límite de NOx es 1500 mg/ Nm³.

Se aumenta la temperatura de las cámaras de combustión de 320°C a 325°C, y el ángulo permanece en 25°.

La analítica revela un aumento de los NOx, equivalente a un aumento en la eficiencia del motor. Se asegura que las temperaturas a las cuales se han subido son seguras para el funcionamiento del motor, es la máxima dentro del trabajo estable del grupo.

Las temperaturas de escape han quedado más bajas que antes de los ajustes. Esto denota que se está aprovechando más la energía de la combustión en forma de energía mecánica y se genera menos energía térmica.

Como se aprecia en la tabla 36, las emisiones quedan por debajo de los límites establecidos para la planta de cogeneración.

Fecha del análisis:	12 / 05 / 2020
Combustible	Gas Natural
Angulo de encendido	25 °
Temperatura Curvas características	325 / 324 °C
Horas motor	66.714 horas
Régimen de carga	95% (3580 kW)
Temperatura gases combustión	460 °C
Medición del porcentaje de O ₂	9,79 %
Medición del porcentaje de CO ₂	2,67%
Medición de CO	733 mg / m ³
Medición NO	1180 mg / m ³
Medición NO ₂	27,6 mg / m ³
Medición NOx	1208 mg / m ³

Tabla 36. Valores del análisis de emisiones con ajustes finales (Fuente: Propia)

5.6.5 Análisis de emisiones comparativo con motor G3

Conociendo que se realizó el overhaul del motor G3 en diciembre de 2019, el estado del grupo ha de ser prácticamente igual que el motor G5. Esta comparación es la forma más representativa de conocer la situación en la que se encontraría el motor G5 sin haber instalado estas bujías de segunda generación.

Este motor también está ajustado para obtener la mayor eficiencia eléctrica cumpliendo con los valores límite de emisiones.

En la siguiente analítica se puede observar como la temperatura de escape está en 481,4°C, una temperatura normal de funcionamiento. En cambio, en el motor G5 con las nuevas bujías se tiene una temperatura de 21,4 °C por debajo.

La temperatura de curvas características es prácticamente igual para ambos motores, con la diferencia de la cantidad de NOx que se generan entre un motor y el otro. La temperatura de escape influye en la reacción química de los óxidos de nitrógeno. Ambos motores están dentro de los límites establecidos y obteniendo un rendimiento elevado.

Hay que pensar que en estos momentos los dos motores han salido de un mantenimiento completo y que a medida que cumplan sus horas de trabajo, este estado inicial se irá degradando. Para el motor G5 se tiene un gran margen para llegar hasta los 1500 mg/m³, pero en referencia al motor G3 se tendrá que realizar un seguimiento más estricto, ya que está en el límite.

En el momento que haya que tomar una medida correctora para reducir las emisiones del motor G3, la primera acción será bajar las curvas de temperatura. Esto provocará una disminución significativa del rendimiento del grupo. Por otra parte, el motor G5 podrá trabajar durante más tiempo a un buen rendimiento de trabajo.

Fecha del análisis:	08 / 05 / 2020
Combustible	Gas Natural
Angulo de encendido	25 °
Temperatura Curvas características	326 / 326 °C
Horas motor	67.100 horas
Régimen de carga	95% (3580 kW)
Temperatura gases combustión	481,4 °C
Medición del porcentaje de O ₂	9,12 %
Medición del porcentaje de CO ₂	6,72 %
Medición de CO	691 mg / m ³
Medición NO	844 mg / m ³
Medición NO ₂	311 mg / m ³
Medición NOx	1476 mg / m ³

Tabla 37. Valores del análisis de emisiones en motor G3 (Fuente: Propia)

Capítulo 6. Ensayos con bujías de segunda generación

En este apartado se experimenta con un nuevo modelo de bujías. Se trata de bujías de precámara como las habituales, pero con ciertas mejoras. Propuestas por la empresa habitual de suministros y reparaciones MWM. Aseguran haber experimentado un aumento del rendimiento desde el 0,3% hasta un máximo de 0,6% el rendimiento del motor. Estos resultados han sido obtenidos en motores funcionando en régimen continuo al 100% de carga. Es en valores próximos al 100% donde resulta más efectivo.

El incremento en el rendimiento no se asegura con la compra de las bujías, pero conociendo que pequeños incrementos en el rendimiento significan grandes ahorros en combustible, se plantea realizar la prueba.

En el estudio económico se comprueba que el riesgo económico es controlado y, que cualquier mejora en el rendimiento compensaría la inversión de la compra.

Finalmente, se decide realizar la prueba en el motor de ensayos. Si los resultados son positivos, se podría llegar a extrapolar los cambios en los demás motores a medida que se tengan que cambiar las bujías por sus horas de funcionamiento.

Entonces, se instalará un equipo completo de 16 bujías en el motor. Antes de esto, se realiza un previo estudio de la eficiencia del motor, con el objetivo de poder percibir y constatar perfectamente si el experimento ha resultado positivo.

Este ensayo incluye pruebas de rendimiento, análisis de emisiones con el equipo calibrado TESTO 340, y realizar ajustes sobre algunos parámetros del motor, necesario para el correcto funcionamiento tras la instalación de estas bujías.

Aunque se comentan algunos aspectos de las analíticas de emisiones, se estudian en mayor profundidad en el apartado anterior "Análisis de los gases de combustión".

6.1 Bujías de precámara

La bujía es el componente del motor que produce el encendido de la mezcla de gas y aire en el interior de los cilindros mediante una chispa. Cuando recibe el voltaje de la bobina la bujía ha de ser capaz de proporcionar un arco de corriente óptimo entre los electrodos.

La intensidad y duración de la chispa tiene que ser suficiente para inflamar la mezcla de aire-combustible. Si la intensidad es baja y no llega a la temperatura adecuada no se quemará bien la mezcla y, el funcionamiento del motor no será el adecuado. Si, por lo contrario, se aplica demasiada tensión, la temperatura del cuerpo de la bujía sube. Con esto podría producirse autoignición de la mezcla antes de generar la chispa, creando knocking (picado de bielas). El autoencendido puede dañar las bielas, en este caso a causa del demasiado avance del encendido. El pistón aún no ha llegado al punto muerto superior y la explosión ya se ha realizado, con lo que tenderá a frenar el motor en vez de ayudar a su giro normal.

Este tipo de bujías están compuestas por un electrodo en el interior de una precámara metálica semiesférica con múltiples orificios. La chispa se genera dentro de la precámara y la radiación de las llamas llega a la cámara de combustión a través de los orificios de la precámara.

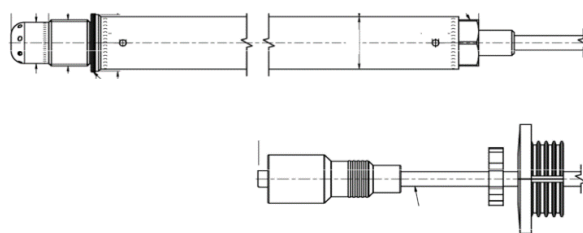


Figura 52. Bujía de precámara (Fuente: Propia)

La ventaja de una bujía de precámara en comparación con una convencional de electrodo directo es la expansión uniforme y mejorada del frente de llama por toda la cámara de combustión, así como la reducción del desgaste de los electrodos y, con ello el aumento de la durabilidad de la bujía.



Figura 53. Bujía de electrodo directo [20]

6.2 Upgrade en bujías de precámara

La principal mejora consiste en la modificación del tamaño de la precámara. En la figura 54 se puede apreciar el aumento en la longitud entre la habitual y esta. Otra modificación es el aumento del número de orificios por los que sale la chispa. Por último, se ha reemplazado el electrodo por varios filamentos que generan la chispa.



Figura 54. Comparativa entre los dos modelos de bujías (Fuente: Propia)

Esta mejora asegura un frente de llama que cubre una mayor superficie de la cámara de combustión, quedando menos inquemados y en consecuencia optimizando la combustión, dejando menos cantidad de posibles puntos calientes. Como se puede apreciar en la figura 54 el modelo de segunda generación cuenta con 9 orificios mientras que la habitual con 6.

En la figura 55, se ha recreado una simulación del funcionamiento de las dos bujías. En el segundo escenario con el nuevo modelo se obtiene un frente de llama que alcanza la mezcla de forma más homogénea en el volumen del cilindro.

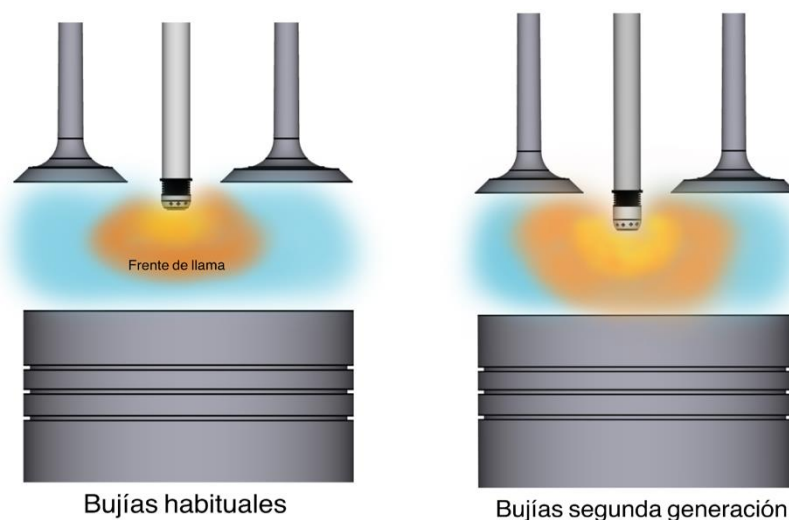


Figura 55. Diferencias de funcionamiento entre los dos modelos de bujía (Fuente: Propia)

6.3 Pruebas de rendimiento

Todas las pruebas de rendimiento se realizan una vez finalizado el mantenimiento de las 65.000 horas. En total se hacen tres pruebas de rendimiento.

1. Prueba de rendimiento con bujías habituales y sin ajustes.
2. Prueba de rendimiento con bujías de segunda generación y con ajustes.
3. Prueba de rendimiento con bujías de segunda generación y con ajustes finales.

Con todos estos estudios de eficiencia se pretende conocer la mejora que aportan las nuevas bujías y los ajustes del motor. Para poder extraer unos resultados de cada ensayo comparables, el motor debe estar durante toda la prueba de rendimiento trabajando al 95%.

El motor es controlado por un PLC que regula la potencia de los motores en relación con la energía que requiere la fábrica. Entonces debe ponerse en manual al 95% desde el propio sistema de control del motor (TEM). En la siguiente figura 56 se observa la pantalla de manejo donde se puede seleccionar la potencia requerida. Al finalizar la prueba tan solo hay que ponerlo en automático para que retome el control el PLC general de la cogeneración.

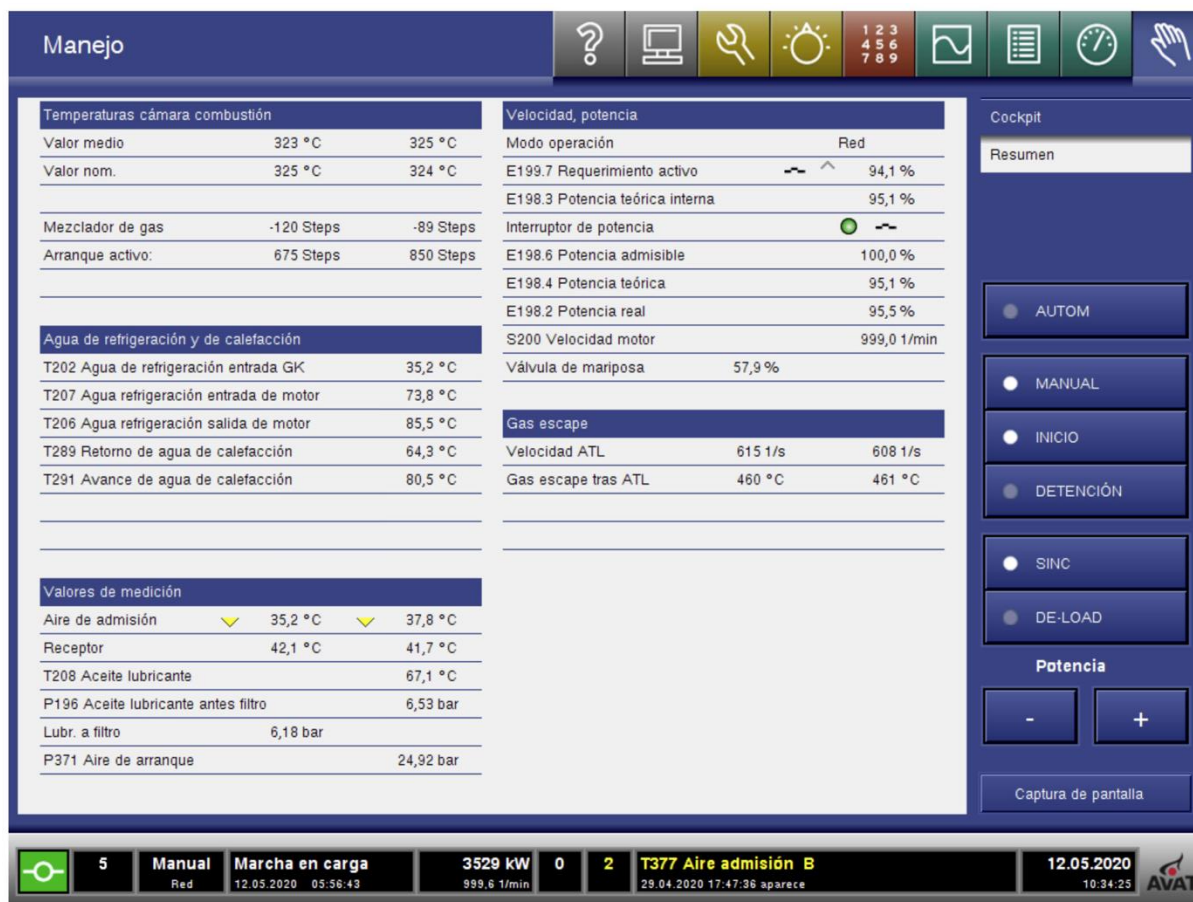


Figura 56. Pantalla de manejo del motor (Fuente: Propia)

6.3.1 Cálculo del rendimiento eléctrico

Para calcular el rendimiento del motor durante la prueba se requiere de estos datos:

- Energía eléctrica en kWh generada durante el periodo de la prueba.
- Consumo de gas en Nm3 durante el periodo de la prueba.
- El poder calorífico del gas (PCI) del día de la prueba. Con este valor se calcula los kWh de gas consumidos.

Se realizarán las pruebas de rendimiento con un mínimo de dos horas de duración. En el inicio de la prueba se anotarán los valores acumulados de gas consumido y los kilovatios generados. Transcurrido el periodo de la prueba se volverán anotar ambos acumulados. La diferencia de estos valores será el consumo de gas de la prueba y la energía generada.

Para realizar los cálculos se requiere del poder calorífico inferior del gas (PCI). En la página web de ENAGAS, concretamente, en la sección de "calidad del gas por municipio" se puede encontrar el PCI del gas diario por población. Este punto es importante, ya que si no se actualizará este parámetro podría conllevar a unos resultados completamente erróneos.



PCI POR MUNICIPIO Guissona

Fecha	PCS diario	PCI diario	Densidad relativa	Factor de corrección
07-may-2020	11.657	10.499	0,5888	0,9273
08-may-2020	11,622	10,468	0,5874	1,0510
09-may-2020	11,623	10,469	0,5881	1,0510
10-may-2020	11,635	10,480	0,5895	0,9273
11-may-2020	11,689	10,530	0,5949	0,9273
12-may-2020	11,720	10,559	0,5950	1,0510

Tabla 38. Valores extraídos de la web de Enagás con los valores de PCI necesarios

Finalmente, solo hay que aplicar la siguiente formula para obtener el rendimiento eléctrico.

$$\text{Rendimiento eléctrico} = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Consumo de gas} \cdot \text{PCI}} \quad [21]$$

Donde:

Tabla 39. Parámetros de la ecuación rendimiento eléctrico. (Fuente: Propia)

Energía producida	kWh
Consumo de Gas	Nm3
PCI	kWh/Nm3
Rendimiento electrico	%

6.3.2 Prueba de rendimiento inicial

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la primera prueba.

PRUEBA DE RENDIMIENTO SIN AJUSTES Y BUJÍAS HABITUALES				
Fecha: 07/05/2020			PCI: 10,499	
Hora de la lectura	Porcentaje de carga	Lectura energía del totalizador (kWh)	Lectura gas del totalizador (Nm3)	Lectura del Gas en KWh
11:10	95%	91.875.305	31.831,23	334.196,1
15:10	95%	91.889.574	35.132,013	368.851,0
Energía generada		Gas Consumido	RENDIMIENTO	41,17%
14.269 kWh		34.654,9 kWh		

Tabla 40. Resultados de la primera prueba de rendimiento (Fuente: Propia)

En la puesta en marcha del motor se cálculo un rendimiento del 42,2%. El motor en este caso está por debajo de su rendimiento inicial. Un 41,17% es un buen rendimiento para un motor con 65.000 horas.

También cabe indicar que la instrumentación del contaje de gas de este proyecto hace que los cálculos sean más precisos, se aproximan más a la realidad.

6.3.3 Prueba de rendimiento con bujías de segunda generación

La siguiente prueba se realiza con las bujías instaladas. Las condiciones de trabajo son las mismas que anteriormente.

PRUEBA DE RENDIMIENTO CON BUJÍAS DE 2N GENERACIÓN SIN AJUSTES				
Fecha: 11/05/2020			PCI: 10,53	
Hora de la lectura	Porcentaje de carga	Lectura energía del totalizador (kWh)	Lectura gas del totalizador (Nm3)	Lectura del Gas en KWh
14:05	95%	91.969.241	54.444,3	573.298,48
16:05	95%	91.976.163	56.039,717	590.098,22
Energía generada		Gas Consumido	RENDIMIENTO	41,21%
6.922 kWh		16.799,74 kWh		

Tabla 41. Resultados de la prueba de rendimiento con bujías mejoradas (Fuente: Propia)

Los resultados indican que hay una mejora en el rendimiento del 0,04% instalando estas bujías.

En este punto se observa que la temperatura de escape ha descendido una temperatura de 20°C. Esto significa que se esta aprovechando mejor la energía de la combustión.

Llegado este punto se puede afirmar que hay ciertas diferencias de funcionamiento entre los dos modelos. Para alcanzar el incremento que sugiere el fabricante de las bujías hay que realizar algunos ajustes en el motor.

6.3.4 Prueba de rendimiento final

Una vez se tienen el estudio de rendimiento previo se procede a realizar los ajustes en el motor. Se ajusta el motor subiendo las temperaturas de las curvas características de cámaras de combustión. Con este ajuste el motor hace la mezcla más rica en gas y, por tanto, más estequiométrica. Concretamente se incrementan las temperaturas de 310°C/309°C a 320°C/319°C (Temperatura Cara A, Temperatura Cara B).

En este punto se realizan comprobaciones de funcionamiento y una analítica de humos. Después de la verificación del motor se decide incrementar la temperatura de las curvas características de 320°C/319°C a 325°C/324°C.

Con estos ajustes el motor trabaja por debajo del límite de emisiones y con un rendimiento alto.

En la figura 57, se muestran los principales datos que se controlan para verificar el correcto funcionamiento del motor.

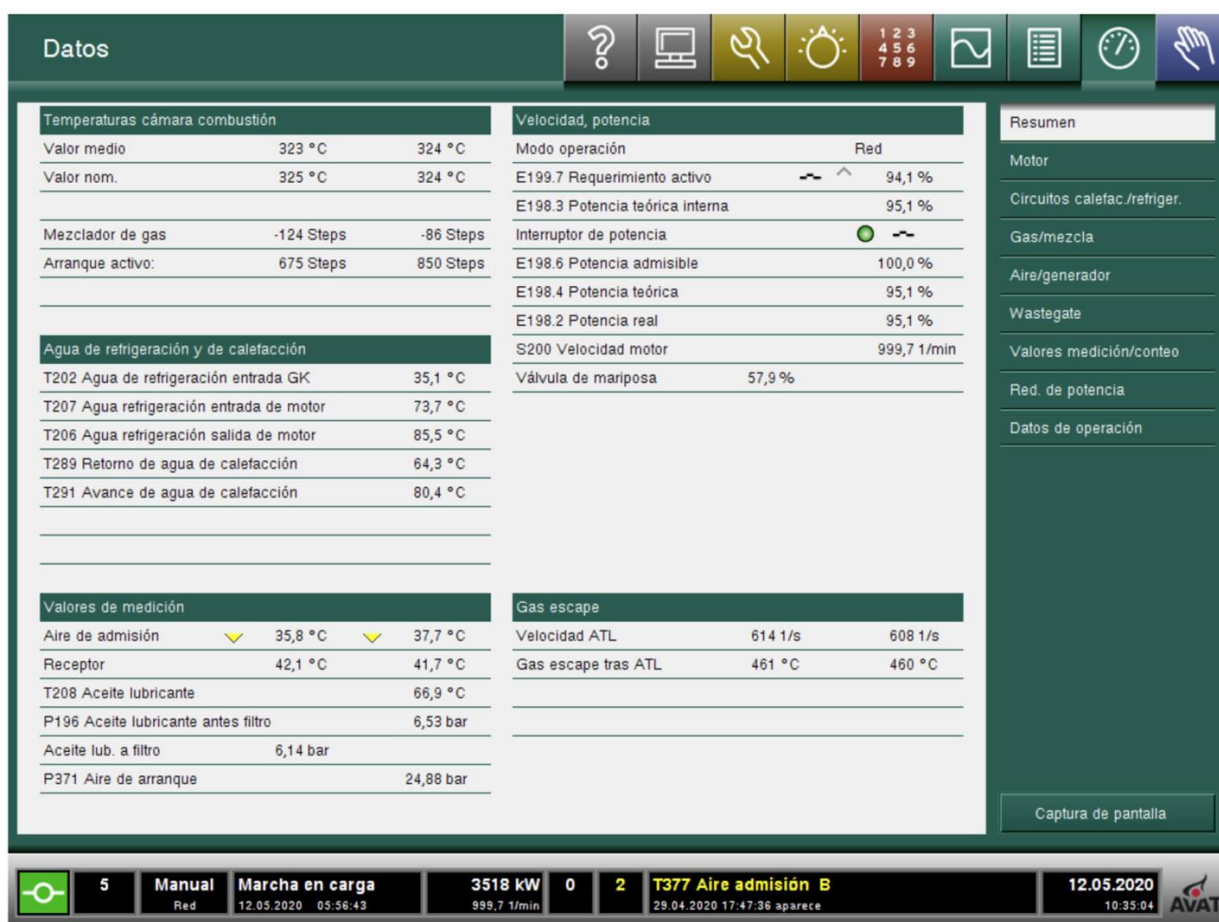


Figura 57. Pantalla de control del motor (Fuente: Propia)

Después de realizar los ajustes se realiza una prueba de rendimiento y se obtienen los siguientes resultados.

PRUEBA DE RENDIMIENTO CON BUJÍAS DE 2N GENERACIÓN Y AJUSTES FINALES				
Fecha: 12/05/2020			PCI: 10,559	
Hora de la lectura	Porcentaje de carga	Lectura energía del totalizador (kWh)	Lectura gas del totalizador (Nm3)	Lectura del Gas en KWh
11:30	95%	92.013.486	64.778,216	683.993,18
15:30	95%	92.026.964	67.838,294	716.304,54
Energía generada		Gas Consumido	RENDIMIENTO	41,71%
13.478 kWh		32.311 kWh		

Tabla 42. Prueba de rendimiento final (Fuente: Propia)

Mediante las nuevas bujías y los ajustes para su correcto funcionamiento se eleva el rendimiento un 0,54 %. Un valor muy satisfactorio.

En estas condiciones se obtiene un buen rendimiento, se permanece con un buen margen debajo del límite máximo de emisiones y se asegura el buen funcionamiento del motor.

En la figura 58 se muestran como han quedado programadas las curvas características. La curva de color rosa es la que sigue el motor, las otras están desactivadas.

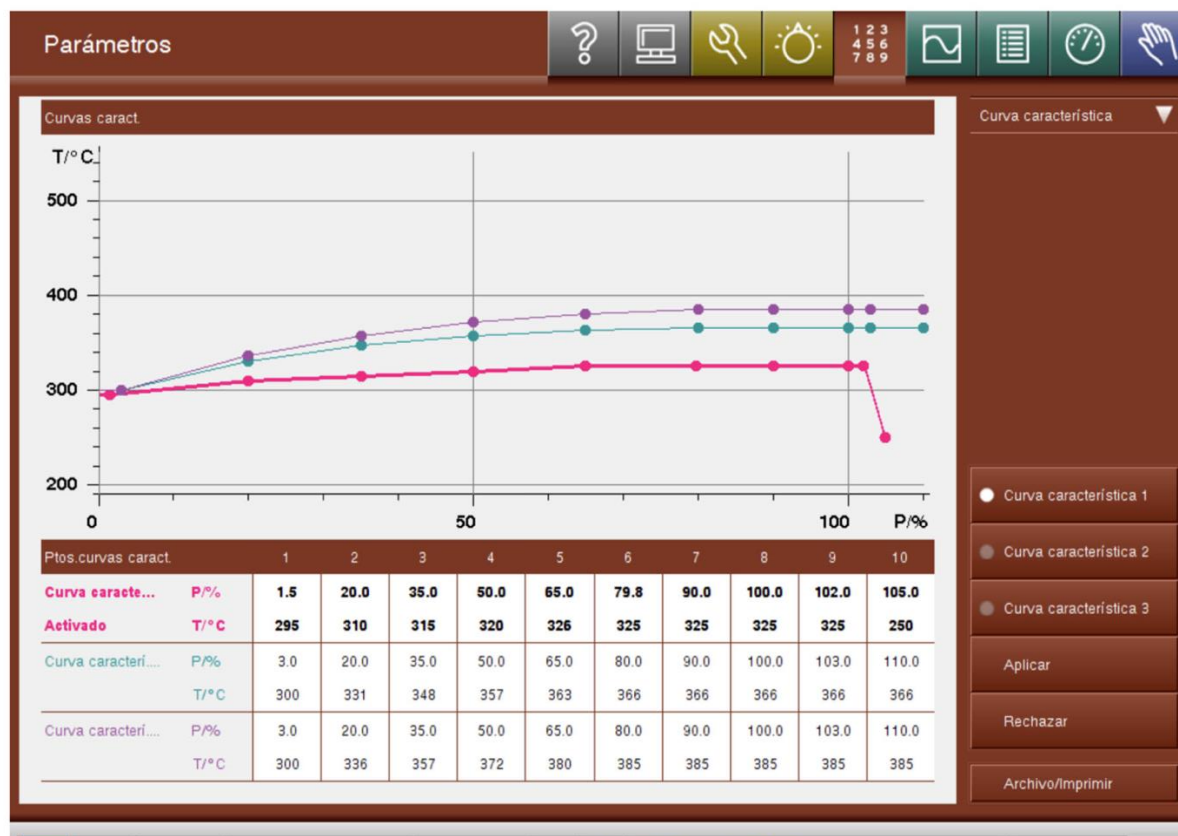


Figura 58. Pantalla de parametrización de las curvas características (Fuente: Propia)

6.3.5 Estudio económico

En el estudio se calcula el ahorro que genera el utilizar estas bujías y los ajustes configurados. Se calcula el consumo de gas de los dos escenarios por separado (inicial y final) y la diferencia entre ellos supondrá el ahorro. Los cálculos se realizan suponiendo que en los dos escenarios el motor trabaja al 95% de su potencia máxima de forma fija.

Conociendo que la potencia eléctrica generada por el motor al 95% es de 3.520 kW, para la primera prueba donde se obtuvo un rendimiento del 41,17%, el motor requiere un consumo de gas de:

$$3.520 \text{ kW elec.} / 41.17\% = \mathbf{8548,9 \text{ kW gas}}$$

Por otra parte, con un rendimiento final del 41,71% el motor para producir una energía de 3.520 kW requiere de un consumo de gas de:

$$3.520 \text{ kW elec.} / 41.71\% = \mathbf{8.439,22 \text{ kW gas}}$$

Las mejoras generan un ahorro en combustible de:

$$\text{Ahorro de combustible} = 8548,9 - 8439,22 = \mathbf{108,67 \text{ kW}}$$

Normalmente el motor opera alrededor de 16 horas al día de lunes a viernes, con lo que trabaja aproximadamente un total de 352 horas mensuales. El ahorro energético mensual se eleva a:

$$\text{Ahorro mensual} = 108,67 \text{ kWh} \times 352\text{h} = \mathbf{38.251,84 \text{ kWh en gas natural}}$$

Con un precio del gas de 0,017 €/kWh el ahorro económico para un mes será:

$$\text{Ahorro económico mensual} = 38.251,84 \text{ kWh} \times 0,017 \text{ €/kWh} = \mathbf{650,28 \text{ €}}$$

Capítulo 7. Prueba de campo PETRONAS GEO NG 40

Este apartado del proyecto se concibe tras acordar una prueba de campo en las instalaciones de BONAREA. El acuerdo entre las empresas BONAREA, PETRONAS y LUBRITEC se basa en realizar una prueba en el motor G5 con el aceite PETRONAS GEO NG 40. La intención de este ensayo es el estudio de una mejora en el consumo de lubricante, limpieza interior del motor y duración del aceite.

Después de celebrar varias reuniones se han pactado los puntos que debe contener este documento a cumplir en la prueba de campo, para que el conjunto de los pasos se realice de forma adecuada, y así extraer unos resultados verídicos y conformes para todas las partes participantes.

Múltiples factores intervienen en el estudio del estado/consumo de aceite, por este motivo se han elegido adecuadamente los parámetros que se van a registrar para su posterior estudio.

A lo largo de este apartado se describen como realizar todas las operaciones y el rol de cada empresa en la prueba de campo.

El ensayo empieza en el final del overhaul, justo en el momento, que se introduce el aceite.

Por otro lado, también se efectúa el overhaul en el motor G-3 en diciembre de 2019, el cual dentro del ensayo tomará un papel de motor comparativo. Este trabajará con el aceite habitual de la marca de SHELL.

Se van a usar los datos del motor G-4 para estudiar el comportamiento del consumo de aceite con y sin anillos rascadores (última modificación del fabricante)

El trabajo de esta prueba se extenderá más allá del presente proyecto, así que en este apartado se quiere reflejar como se ha organizado la prueba, los estudios previos a la prueba, las consideraciones iniciales y los parámetros que se recogerán para el post-estudio. No se incluyen los informes del overhaul sobre el estado de la limpieza interior y otros, ya que se extendería demasiado el documento.

7.1 Requisitos generales de un aceite lubricante

7.1.1 Generalidades

La selección de un aceite lubricante que sea adecuado a la potencia de salida nominal, tipo de combustible y ciclo de trabajo del motor es muy importante para asegurar el mínimo de desgaste, mínimo de sedimentos en cámara de combustión y una buena duración del aceite.

Los lubricantes están fabricados con aceites base de alta calidad y reforzados con aditivos para obtener el nivel de detergencia, dispersabilidad, resistencia a la oxidación, reserva a la alcalinidad y otras propiedades.

El aceite base debe tener unas buenas propiedades de viscosidad/temperaturas para proveer un buen arranque en frío y unas buenas propiedades de lubricación a la temperatura de trabajo.

Aunque los fabricantes no revelan sus formulas se conoce que aproximadamente los aceites para motores industriales a gas utilizan la siguiente combinación.

Aproximadamente el 85-90% se compone por:

- Aceite Base (base mineral o sintética).

El porcentaje restante es donde entra en juego los aditivos, cada fabricante tiene su propia formula. Dentro de los aditivos se remarcan los siguientes como más importantes:

- Detergente.
- Dispersante.
- Anti-Oxidante.
- Anti-desgaste.
- Anti-espumante.
- Anti-Herrumbre.
- Inhibidores de corrosión.

7.1.1.1 Lubricantes minerales y sintéticos

La gran mayoría de los lubricantes comerciales están basados en el petróleo. Estos representan la solución más económica para la mayoría de los requisitos de lubricación. Tanto el lubricante de SHELL como el de PETRONAS sus bases se componen por aceites minerales procedentes del petróleo.

Los lubricantes sintéticos se obtienen a partir de procesos químicos denominados síntesis química. Es un aceite de mayor calidad y mejores prestaciones, pero con un coste elevado.

7.1.1.2 Grado de viscosidad

La viscosidad de los aceites para motores se identifica por el sistema de clasificación de la Sociedad Americana de Ingenieros de Automoción (SAE). Los requisitos de viscosidad dependen de la temperatura máxima de trabajo y de las temperaturas previstas para el arranque.

En este caso no se requiere de un aceite multigrado, puesto que el motor al estar siempre calefactado no se arrancará en frío. Los aceites multigrado se dirigen más hacia la automoción, donde el vehículo se arranca en frío en invierno y a temperaturas cálidas en verano (mantiene estable la viscosidad del aceite ante cambios de temperatura).

El aceite de motor industrial está formulado para aplicaciones del tipo monogrado, que se utilizan para cambios de temperaturas mínimos.

7.1.1.3 Número Base Total (TBN)

El número Base Total (TBN) en unidades de mg KOH/g es una medida de la alcalinidad total del aceite lubricante. Parte de esto se atribuye a los aditivos detergentes/dispersivos en el aceite, que son alcalinos. La combustión puede formar pequeños compuestos ácidos, siendo necesario tener una reserva de alcalinidad para proteger el motor contra la corrosión y el desgaste. Es un parámetro importante que hay que vigilar periódicamente con las analíticas de aceite.

7.1.1.4 Número Acido Total (TAN)

El número de ácido total (TAN) es la medida de los ácidos orgánicos que existen en el aceite lubricante. Este parámetro se expresa en mg KOH/g y representa el grado de degradación por oxidación del lubricante. Al principio del uso del aceite es relativamente bajo y comienza a subir con la presencia de ácidos derivados de la oxidación del aceite.

7.1.1.5 Seguimiento del aceite

EL mantener una buena calidad del aceite lubricante por parte del usuario es tan importante para el buen funcionamiento continuo del motor como la selección del nuevo aceite. La mejor forma de lograrlo es tomando muestras del aceite con regularidad, preferiblemente con el motor en marcha y a unas condiciones de trabajo estables.

El análisis del aceite constará de dos partes. La primera parte corresponde a los resultados de las pruebas físicas, tal como viscosidad, contenido de agua, número base y ácido total, además de pruebas adicionales para investigar un problema dado. La segunda parte corresponde a los resultados del análisis espectro-químico, indicando la masa de cada elemento detectado en partes por millón (ppm).

7.2 Datos, organización y estudios previos

7.2.1 Información previa a la prueba

El fabricante MWM realizó una mejora en el sistema de lubricación de este motor. Consiste en una camisa con capacidad para albergar un anillo rascador (Cutting ring). Éste mejora la función del raspado del cilindro evitando que el aceite pueda penetrar con facilidad en la cámara de combustión y sea quemado. Ningún motor tenía dicha tecnología en su compra, a medida que se han realizado los mantenimientos se han introducido en el motor G-3 y G-4. En el mantenimiento de marzo se introduce la mejora en el motor G-5.

Para entender el próximo apartado es necesario conocer los siguientes datos de los equipos:

7.2.1.1 Cambios de aceite

Cambios de aceite Motor G-5:

- I. 1705 L (marzo 2016), duración: 4596 horas.
- II. 1780 L (Julio 2019). Duración: 12.392 horas.

Cambio de aceite Motor G-4:

- I. 1826 L (febrero 2016), duración 4.311 horas.
- II. 1851 L (febrero 2017), duración 4.155 horas.
- III. 1900 L (junio 2018, overhaul), duración: 3.742 horas

7.2.1.2 Modificaciones mecánicas de relevancia

Overhaul realizado en el Motor G-4 (junio 2018):

- Montaje de camisas con ranura para la introducción de anillo rascador (cutting ring).

Overhaul realizado en el Motor G-3 (diciembre 2019):

- Montaje de camisas con ranura para la introducción de anillo rascador (cutting ring).

Overhaul realizado en el Motor G-5 (marzo 2020):

- Montaje de camisas con ranura para la introducción de anillo rascador (cutting ring).

7.2.1.3 Aceite utilizado hasta la fecha por todos los motores

- Shell Mysella S5 N 40

7.2.2 Estudio previo del comportamiento del aceite usando el lubricante de SEHLL

Se considera importante consolidar la tendencia del comportamiento del aceite lubricante en el motor G-5. Para este cometido se va a analizar los antecedentes del lubricante consumiendo aceite SHELL. Así mismo en este estudio se pretende mostrar claramente el consumo en reposiciones y el estado del aceite durante el periodo de 2016 hasta la fecha. Se han utilizado los resultados de las analíticas de aceite que se realizan mensualmente para cada motor.

Paralelamente se realiza el mismo estudio para el motor contiguo G-4.

7.2.2.1 Análisis consumo aceite

Para realizar el análisis se expresan los consumos de aceite en g/kW, de esta manera se puede comparar directamente ambos motores. Es un modo de evaluar con mayor precisión el rendimiento del aceite.

Trabajando los motores en condiciones idénticas se aprecia una diferencia notable en el consumo. Durante todo el periodo que se realiza el análisis el motor G-4 tiene un consumo considerablemente inferior al motor G-5.

Como se ha comentado anteriormente en junio de 2018 se realiza el overhaul y se introducen los aros rascadores en el grupo G4. El consumo de aceite ha bajado desde entonces.

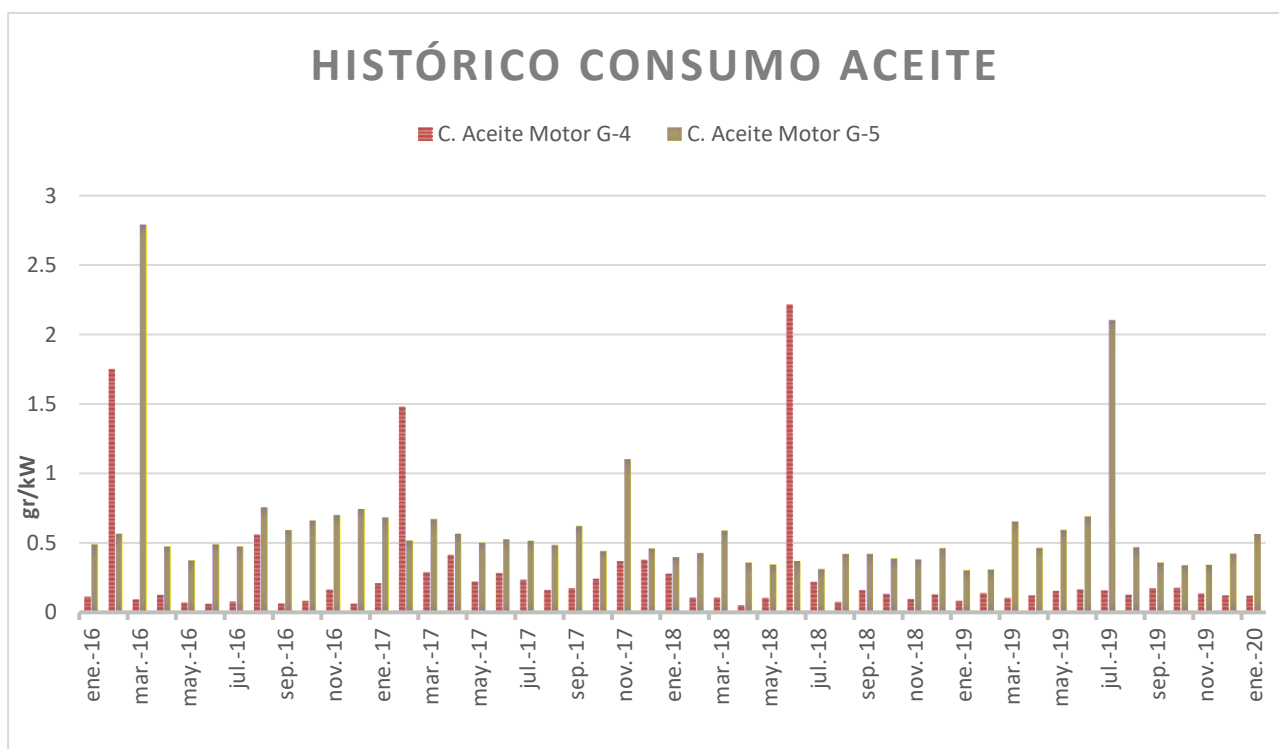


Figura 59. Gráfica consumo de aceite (Fuente: Propia)

En el histórico de consumo de aceite (figura 59) se ha registrado todos los consumos mensuales de lubricante desde enero del 2016 hasta setiembre del 2019. En ella se pueden apreciar los cambios de aceite mencionados anteriormente (los cambios de aceite son los meses que se genera un pico elevado de consumo).

En la gráfica de la figura 60 se han excluido los cambios de aceite para tener un mayor enfoque en el consumo por reposiciones. Se entiende como reposición al añadido de aceite que realiza el motor de forma automática cuando el nivel del Carter baja.

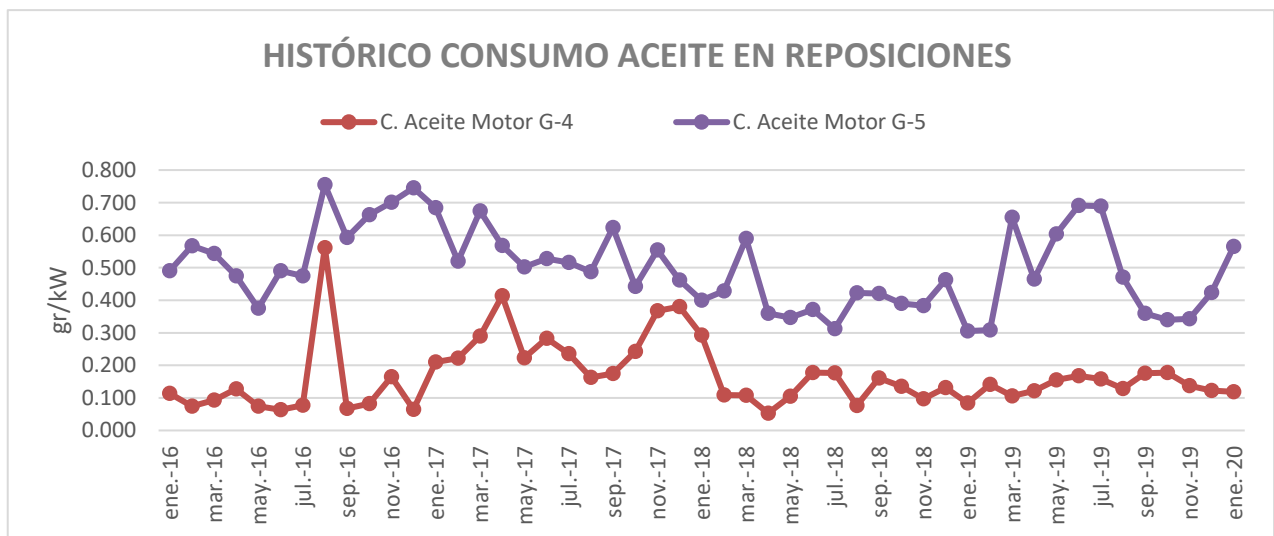


Figura 60. Gráfica histórico aceite en reposiciones (Fuente: Propia)

El comportamiento del motor G-4 después de incorporar el anillo rascador tiene una tendencia a estabilizar el consumo de aceite, pues se puede afirmar que se han eliminado puntas de consumo espontáneas. De esta forma, se puede garantizar que el balance de la incorporación del anillo es positivo.

7.2.2.2 Evolución de las propiedades:

La gráfica de evolución del aceite enlaza el consumo y los cambios de aceite con el parámetro TAN.

Se identifican los cambios de aceite donde en la gráfica coinciden las columnas de alto consumo con una bajada drástica del TAN. Como es de esperar cuando se realiza el cambio de lubricante el parámetro estudiado vuelve a su punto inicial, puesto que sus propiedades vuelven a ser las iniciales.

Se puede apreciar como después de un cambio de aceite el TAN sube progresivamente a medida que el motor trabaja. El lubricante se va degradando y aumenta la presencia de los ácidos orgánicos.

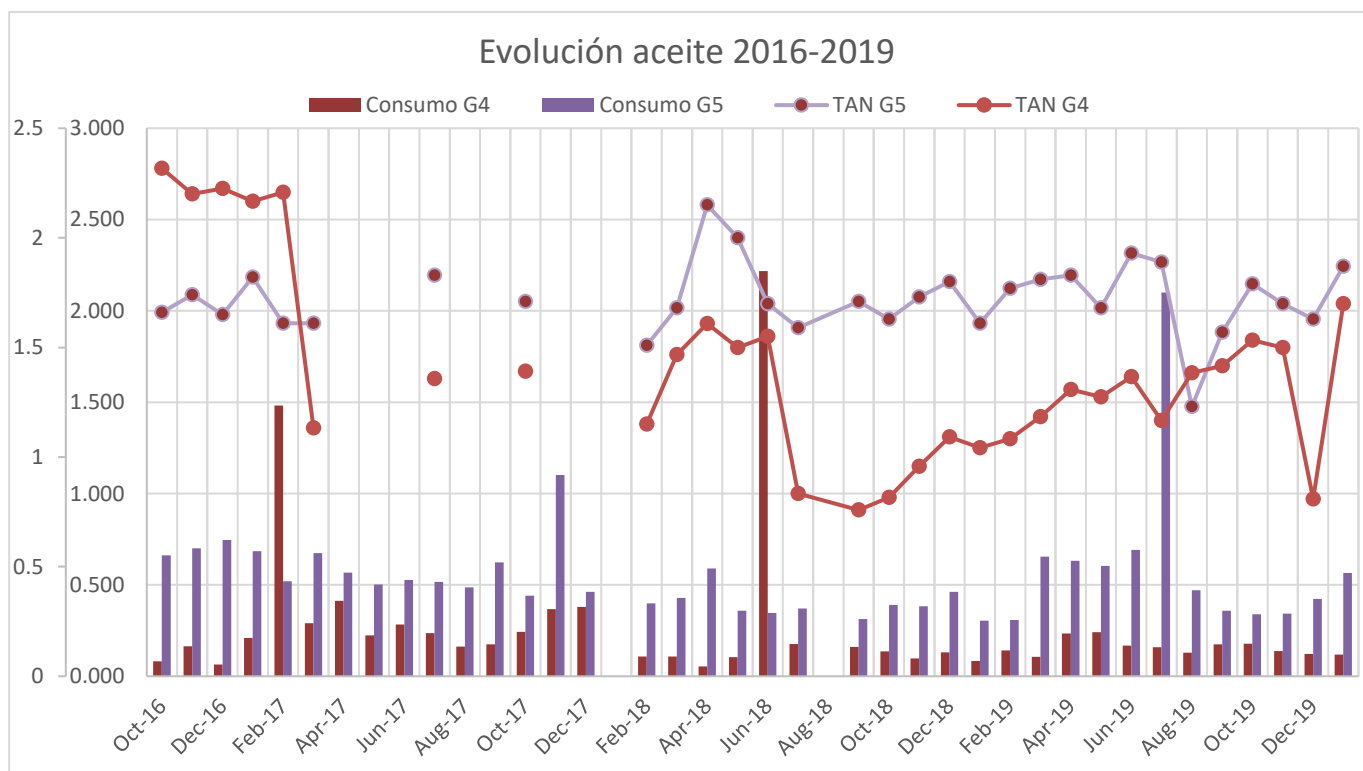


Figura 61. Gráfica evolución del aceite (Fuente: Propia)

Relacionando el consumo con la medida de los ácidos orgánicos, el motor G-4 debido a su bajo consumo de lubricante tiene una pendiente más inclinada, que se puede interpretar como una velocidad más alta de desgaste. Por otro lado, el motor G-5 tiene una línea de tendencia más plana probablemente por el mayor consumo que, por ende, crea una renovación más constante del lubricante y sus propiedades.

En el motor G-4 después de 5.619 horas del cambio de aceite (junio 2018) los ácidos orgánicos han aumentado un 1,04 mg KOH/g.

Mensualmente el consumo de cada motor suponía una media de:

- Motor G-5: 516 L
- Motor G-4: 151

Partiendo de estos valores y con el conocimiento de la capacidad del cárter (2000L) en cuatro meses el motor G-5 ha consumido la misma capacidad que contiene el cárter, esto podría dar paso a pensar que el aceite se ha podido renovar en su totalidad. Este ciclo de consumo no equivale a un cambio de aceite, pero parece ayudar a mantener los valores de ácido orgánico, viscosidad, etc...

Esto origina que los análisis den un resultado satisfactorio del estado del aceite. El laboratorio de análisis de SHELL no suele indicar entonces que debe realizarse un cambio de aceite, ya que no lo considera necesario vistos los resultados. Los técnicos de cogeneración llegadas las horas límite de uso del aceite toman la decisión de cambiar el aceite.

7.2.2.3 Curvas consumo anual

Con la intención de mostrar unos datos más tangibles se muestran los resultados anuales de ambos motores, donde se puede extraer como conclusión que el motor G-4 tiene un consumo bastante menor que el G-5. Además, el anillo rascador ha bajado el consumo por debajo de la media, ya que la media de los 4 años está en 0,17 gr/kWh.

No se incluyen en la siguiente gráfica la cantidad de lubricante de los cambios de aceite que se han realizado a lo largo del periodo estudiado.

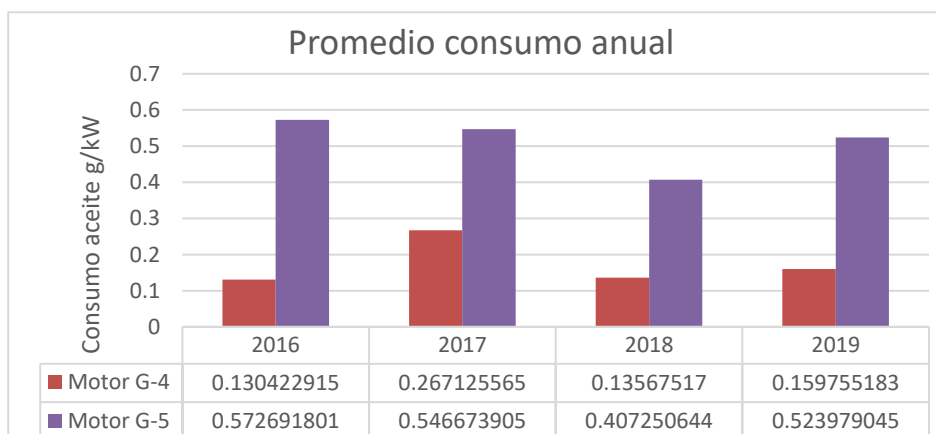


Figura 62. Gráfica promedio consumo anual (Fuente: Propia)

Comparando los resultados con las especificaciones de consumo del fabricante claramente el motor G-4 está por debajo. Por otro lado, aunque el consumo del motor G-5 es mayor, trabaja dentro del umbral de las especificaciones del fabricante.

Las especificaciones del fabricante marcan un consumo a plena carga (3700 kW) del motor de 0,6 g/kWh $\pm 20\%$ para aceite mineral y un 0,4 g/kWh $\pm 20\%$ para aceite sintético.

7.2.2.4 Relación del consumo del motor con la carga de trabajo

En este estudio se analiza cómo puede influir la carga en la cual trabaja el motor en el consumo de aceite. Se han recogido los promedios mensuales a la carga que trabaja el motor y el consumo en g/kWh y, se han graficado para poder observar alguna tendencia de comportamiento.

Analizando la gráfica “relación consumo motor y porcentaje de carga G-4” no se deduce ningún comportamiento que pueda relacionar directamente la carga de trabajo del motor con el consumo de aceite. El promedio de trabajo para este motor está en el valor del 80%.

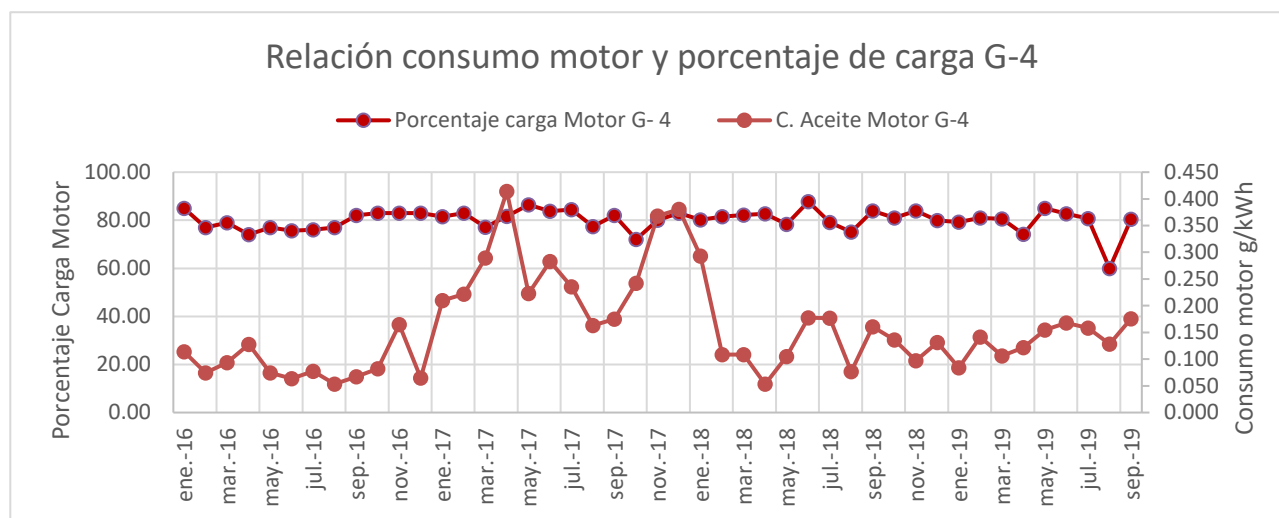


Figura 63. Gráfica relación consumo-potencia motor G4 (Fuente: Propia)

Analizando la gráfica de la figura 64 se extrae la misma conclusión para el motor G5, no se puede extraer ninguna relación. En este motor el promedio de carga para estos años está en el 82%.

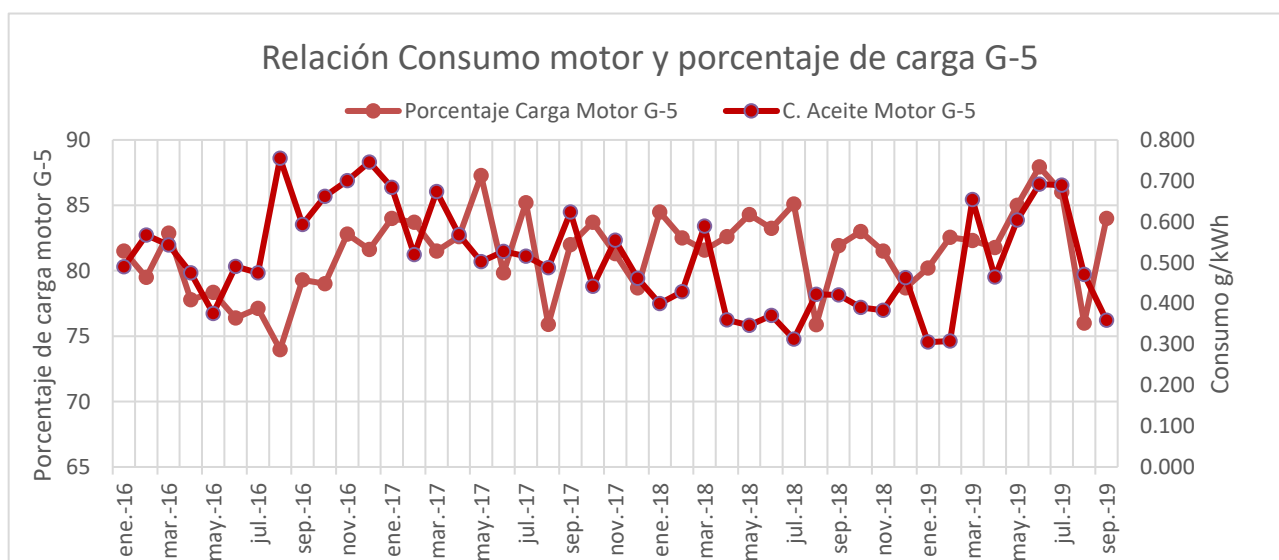


Figura 64. Gráfica relación consumo-potencia motor G5 (Fuente: Propia)

7.2.2.5 Próximos pasos para mejorar los análisis

Un punto para mejorar las analíticas para el futuro estudio y toma de medidas correctoras sería volver a incorporar el parámetro de TBN. En un principio se analizaba en cada analítica de aceite.

Actualmente no se puede ver lo cerca que está el TAN del TBN. Desde 2016 el laboratorio de SHELL dejó de comunicar este parámetro.

El fabricante indica como valores condenatorios que el TBN tiene que ser como mínimo 2 mg KOH/g y el TAN no superior al TBN.

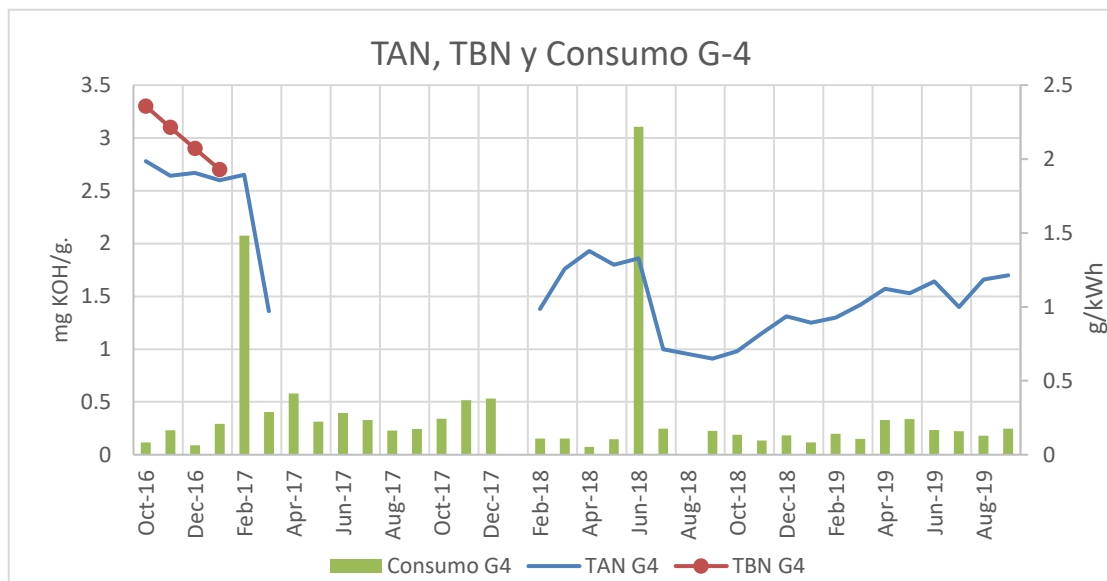


Figura 65. Gráfica TBN, TAN y Consumo G4 (Fuente: Propia)

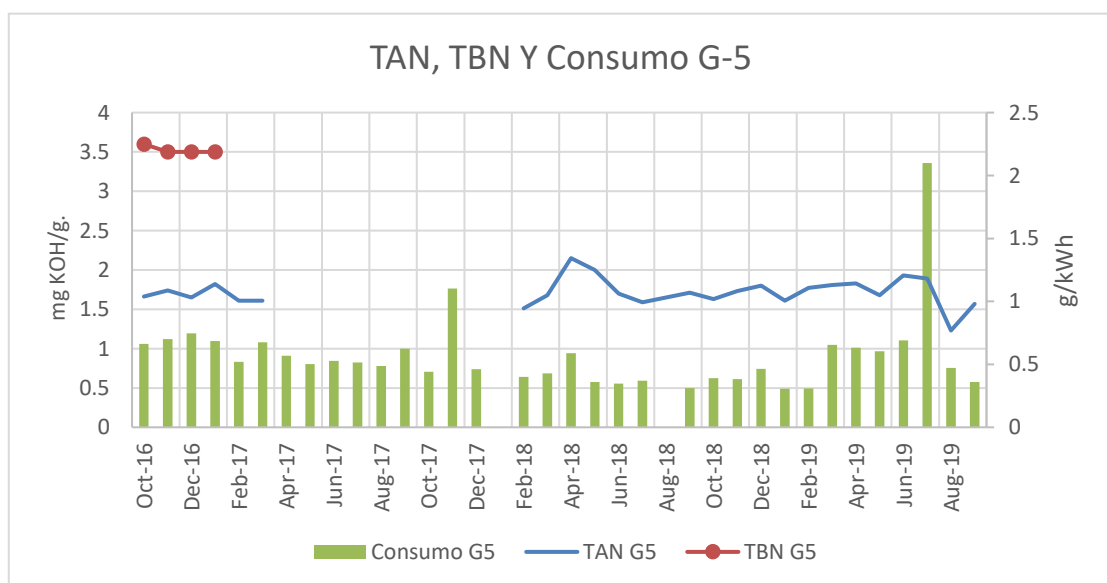


Figura 66. Gráfica TBN, TAN y Consumo G5 (Fuente: Propia)

7.2.3 Descripción y consideraciones iniciales previas a la prueba

7.2.3.1 Gas natural

El tipo de gas empleado tiene una incidencia directa sobre la vida del lubricante, por lo que debe controlarse su composición típica durante el periodo de prueba y proceder a informar si hubiera cambios significativos.

Para llevar el debido seguimiento se solicitará mensualmente una analítica de la composición del gas a la empresa suministradora (GALP).

7.2.3.2 Análisis de la composición del Gas Natural

A continuación, se adjunta un análisis de composición del gas natural que se consume en la fábrica. Estos datos provienen del equipo de análisis más cercano físicamente a la red de distribución.

Fecha	Posicion	Cromatografo	Validado	PCS (kWh/m3)	PCI (kWh/m3)	Densidad relativa	N2 (%)	CO2 (%)	C1 (%)	C2 (%)	C3 (%)	IC4 (%)	NC4 (%)	ICS (%)	NCS (%)	C6+ (%)
04/11/2019	6	6	S	11,633	10,477	0,5887	0,2087	0	94,2896	4,6283	0,5371	0,1611	0,163	0,0107	0,0014	0
05/11/2019	6	6	S	11,628	10,474	0,5931	0,345	0,2035	93,4378	5,2104	0,5244	0,1314	0,1344	0,0103	0,0023	0,0005
06/11/2019	6	6	S	11,651	10,501	0,6141	0,8306	1,1	90,076	7,004	0,7877	0,0865	0,0907	0,0146	0,0067	0,0034
07/11/2019	6	6	S	11,703	10,548	0,6122	0,7291	0,8691	90,105	7,4254	0,6793	0,0833	0,0892	0,0116	0,0055	0,0026
08/11/2019	6	6	S	11,709	10,552	0,6061	0,5427	0,5896	91,0766	6,9685	0,6147	0,0907	0,1002	0,0106	0,0043	0,0018
09/11/2019	6	6	S	11,674	10,517	0,5977	0,3589	0,3187	92,4375	6,1794	0,49	0,0983	0,1049	0,0087	0,0026	0,0009
10/11/2019	6	6	S	11,628	10,472	0,5876	0,1419	0	94,1493	5,0983	0,3696	0,1159	0,1167	0,0072	0,0011	0

Tabla 43. Análisis de la calidad del gas (Fuente: Propia)

Nomenclatura de los componentes:

C1 = Metano

C2 = Etano

C3 = Propano

IC4 = Isobutano

7.2.3.3 Almacenamiento del lubricante

Se almacena el aceite de los motores en un depósito de 20.000L de capacidad calefactado mediante agua caliente, manteniendo así el aceite a una temperatura de 70°C. Con un promedio de consumo de 350L por motor (5 motores en total e incluyendo cambios de aceite), hay capacidad para alimentar a los grupos alrededor de un año.

Celebrándose un año del aceite dentro del depósito y sometido a 70°C en continuo durante este tiempo, se creyó interesante tomar una analítica para comprobar las propiedades del aceite.

Se recogió una muestra de aceite por parte de los técnicos de la cogeneración y fue enviada al Laboratorio de LUBRITEC (LUBRI: DETECTA).

El estado del aceite ha resultado correcto según el informe que ha proporcionado el laboratorio. Las propiedades del aceite no se han visto afectadas, todos los parámetros se mantienen. En cambio, ha surgido un efecto de oscurecimiento del aceite.

Visto esto, no hay ningún problema en almacenar el aceite de este modo.



Figura 67. Muestra ennegrecida del depósito de 20.000L (Fuente: Propia)

7.2.3.4 Almacenamiento lubricante Petronas

Atendiendo a las necesidades del motor de reponer aceite de manera automática, se acomodará un contenedor de aceite PETRONAS GEO NG en el interior de la sala de cogeneración.

El lubricante se conservará a una temperatura de 25-30°C (temperatura de la sala). No dispondrá de calentamiento, pues con la temperatura de la sala la viscosidad del aceite es correcta para fluir mediante gravedad hacia el interior del motor.

7.2.4 Seguimiento de la prueba

7.2.4.1 Análisis del lubricante

De acuerdo con las recomendaciones de MWM, para asegurar la perfecta conservación del motor se deben efectuar las tomas de muestra según las horas de operación siguientes: 100 – 250 – 500 – 1000 – cada mil horas, hasta acercarse a valores límite (condenatorios) del aceite, momento en el que se realizan analíticas a intervalos cada vez más cortos.

Teniendo en cuenta el criterio del fabricante y la política de toma de muestras establecida en el departamento de cogeneración (analítica mensual, 400 horas aprox.). Se acordó realizar las tomas de muestra del siguiente modo:

- Una vez realizado el cambio de aceite se realizará una analítica según las siguientes horas de operación: 100 – 250 – 500 – 1000 - 400 horas (mensualmente), hasta nuevo cambio de aceite.



Figura 68. Secuencia para tomar las muestras de aceite (Fuente: Propia)

La toma de muestra en los intervalos descritos anteriormente permitirá a su vez realizar un control y seguimiento óptimo del lubricante.

7.2.4.2 Toma de muestras

Para la correcta ejecución de las recogidas de aceite, PETRONAS LUBRICANTS aportará un soporte técnico, tomando las primeras muestras y formando al equipo técnico de BONÀREA.

PETRONAS suministrará los kits de recogida de análisis de lubricante. Consiste en envases especiales para recoger aceite y las fichas para rellenar la información necesaria.

Una vez finalizado el periodo de prueba, a través del programa web de servicio de análisis EVERLUB, podrá gestionarse el análisis del aceite directamente con el mismo laboratorio. Los resultados, serán siempre accesibles a través de la plataforma web de EVERLUB, serán supervisados por el contacto técnico de PETRONAS, que recomendará las acciones oportunas según el caso.

BONÀREA gestionará directamente las muestras con el laboratorio POLARIS (ubicado en Polonia), teniendo disposición de los kits de análisis.

7.2.4.3 Procedimiento para la toma de muestra:

Para realizar correctamente la recogida de la muestra del motor el equipo de PETRONAS aconseja tomar la muestra de la siguiente manera:

- La muestra debe tomarse del circuito mientras el motor está funcionando a la temperatura normal de operación.
- Al menos 200 ml de aceite debe drenarse y eliminarse adecuadamente antes de tomar la muestra.
- Debe enjuagarse el envase de toma de muestra con el aceite del circuito.
- Asegúrese de que la muestra de aceite lubricante no se contamine evitando que se ensucie la boca del envase, y cierre el envase a continuación de su llenado.
- Se recomienda que el proceso de toma de muestra sea realizado siempre por el mismo operador y si esto no es posible, formar en el procedimiento de toma al nuevo operador.

7.2.4.4 Información que debe acompañar a la muestra:

- Fecha de la toma de muestra.
- Horas de operación del aceite.
- Horas de operación del motor.
- Volumen de aceite añadido desde el anterior control.
- Otras informaciones: relacionadas con la operación del motor y mantenimientos realizados.

7.2.4.5 Datos para el debido seguimiento del motor

Para la correcta evaluación de los resultados y la obtención de conclusiones es necesario monitorizar y/o llevar un control de, al menos, los siguientes parámetros relacionados con la operación del motor:

- Reposiciones de producto (litros).
- Potencia de operación de Motor 5 (%).
- Consumo de aceite (g/kWh).
- Temperatura del aceite.
- Temperatura de la sala de cogeneración.
- Consumo de gas.
- Energía producida.

7.2.4.6 Reuniones periódicas de seguimiento

Los mejores resultados se obtienen a través de una estrecha colaboración entre las empresas participantes, es por ello por lo que se celebrarán reuniones y visitas en la planta para comentar y evaluar conjuntamente los resultados que se vayan obteniendo a lo largo de la prueba.

7.2.4.7 Inspecciones mediante Boroscopio

Como control complementario al de las analíticas programadas del aceite, se concertarán dos inspecciones al año con boroscopio. Se inspeccionará y se tomarán fotografías del interior del motor, en especial los puntos críticos preestablecidos siguientes:

- Parte superior del pistón.
- Parte inferior de la culata (especial atención a la formación de carbonilla).
- Válvulas de escape y admisión.
- Parte superior camisa.

7.2.4.8 Lubricante de la prueba

El fabricante del motor marca una capacidad de 2000L en el cárter. La realidad después de llenar un motor es alrededor de 2200L (el fabricante no contempla el intercambiador y los tubos que van hacia él). De tal manera que para desarrollar la prueba se acuerda un total de 3 recipientes de 1000L.

Se ha pactado la compra de 3000L a 2,05€/L, con un descuento de 400L. De esta manera se facturarán un total de 2600L.

3.2.5 Turbocompresores

Elemento susceptible de consumo de Lubricante.

El grupo turbocompresor es un elemento de elevada importancia dentro del funcionamiento del motor. Un buen estado y funcionamiento de estos grupos significa un buen rendimiento y trabajo del conjunto.

Los grupos turbocompresores instalados de fábrica son ABB TPS 57E01.

El sistema de lubricación de los cojinetes del turbocompresor se alimenta por el circuito de aceite del propio motor. Este sistema aparte de su función como lubricante también disipa el calor de los cojinetes y del conjunto.

El espacio existente entre el compresor y la turbina donde se encuentra el aceite queda sellado por los aros de pistón, montados uno en el eje junto al compresor y otro contiguo a la turbina.

Los aros aseguran que el aceite no pueda llegar a acceder a la zona del compresor y la turbina. Al mismo tiempo tampoco deja que los gases penetren en el alojamiento de los cojinetes.

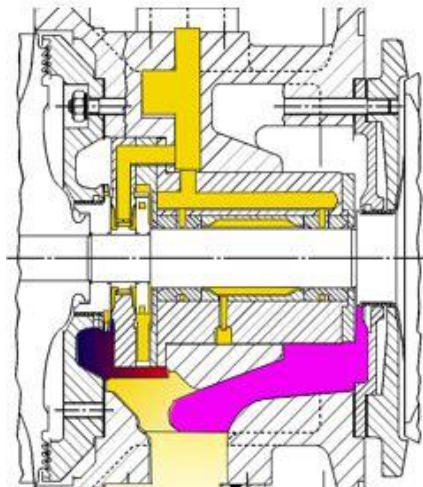


Figura 69. Sistema de lubricación turbocompresor (Fuente: Propia)

SISTEMA DE ACEITE LUBRICANTE TURBOCOMPRESOR:

- Presión de trabajo: 2...4,5 [Bar]
- Temperatura de aceite permisible: $T_{oil\ inlet} = 30...105^{\circ}\text{C}$
- Presión admisible durante el encendido: $P_{oil\ inlet} \leq 8,0$ [Bar]
- Presión post-lubricación (motor parado): $P_{oil\ inlet} \leq 1,0$ [Bar]
- Temperatura permisible a la salida del turbocompresor: $T_{oil\ outlet} \leq 160^{\circ}$
$$T_{oil\ outlet} \leq T_{oil\ inlet} + 55\text{K}$$
- Todos los aceites lubricantes que se usan para motores son admisibles. SAE 40, SAE 30, SAE 20W, SAE 10W

7.2.4.1 Mantenimiento Turbocompresores

Un factor para tener en cuenta es la sustitución de los grupos turbocompresores que se ha practicado en el mantenimiento del grupo G-5. Cabe el indicio que llegando a horas condenatorias donde debe hacerse el mantenimiento, los grupos compresores pueden perder aceite por el “pistón ring” (anillo que debe asegurar la estanqueidad del aceite).

Durante enero del 2020 se ha realizado el mantenimiento de dos grupos turbocompresores, los cuales irán instalados en el motor de pruebas. En la figura 70 se muestra el despiece en el transcurso del mantenimiento.

Una vez desmontado el turbo, comprobado el estado de sus componentes y realizado la comprobación dimensional de huelgos y tolerancias, se remplazan los siguientes elementos:

- Eje de la turbina.
- Piston ring (Lado turbina).
- Pistón ring (Lado compresor).
- Cojinetes cuerpo eje (radial).
- Cojinetes de empuje (axial).
- Circlips (anillo seeger).



Figura 70. Despiece turbocompresor junto con los nuevos recambios (Fuente: Propia)

7.3 Inicio de la prueba y primeros resultados

En el mes de marzo se realiza el overhaul del motor y, es en la finalización de este mantenimiento cuando se introduce la cantidad de 2000L de aceite PETRONAS GEO NG.

En el transcurso de este mantenimiento se recogen imágenes de todos los componentes que están en contacto con el circuito de lubricación. En el próximo mantenimiento programado se compararán las imágenes con el estado del motor para verificar si la limpieza interna del motor ha mejorado en comparación con el aceite usado habitualmente.

Tras realizar el mantenimiento e incorporar el aceite, la puesta en marcha definitiva del motor se retrasa debido a diferentes problemáticas. Finalmente, se pone en marcha a finales de abril.

En referencia al consumo, después de la puesta en marcha ha bajado drásticamente. Cabe remarcar que la instalación de aros rascadores ha aportado una gran mejora. A partir de aquí, se debe realizar un seguimiento para observar si este motor con el aceite de PETRONAS se comporta de la misma forma que el motor G3 y G4.

Se comparan los consumos del motor G3 y G5 para el mes de mayo, pues disponen del mismo contador. Los resultados son satisfactorios, se ha conseguido bajar el consumo de lubricante del motor G5. Como se observa en la tabla 44, los ratios de consumo para ambos motores son muy parecidos.

Esta disminución en el consumo de aceite viene dada por la instalación de los aros rascadores.

MOTOR G5	
Consumo mes de mayo	132 litros
Producción eléctrica mayo	789.650 kWh
Ratio de consumo	0,1463 gr/kWh
Motor G3	
Consumo mes de mayo	169 litros
Producción eléctrica mayo	1.012.500 kWh
Ratio de consumo	0,1489 gr/kWh

Tabla 44. Primeros resultados de consumo de aceite (Fuente: Propia)

Capítulo 8. Programa de inversión I+D

Para desarrollar las mejoras e implementaciones de este proyecto se solicitó desde el departamento de cogeneración una inversión I+D a la dirección de CORPORACIÓN ALIMENTARIA DE GUISSONA.

Un programa de inversión I+D (investigación y desarrollo) se basa en la investigación de la implementación de nuevos productos en colaboración con distintas empresas. Con el objetivo de encontrar un beneficio económico/funcionamiento y adquirir más conocimientos reales.

Es una actividad con riesgo, puesto que existe una cierta incertidumbre sobre el retorno de la inversión.

El ejemplo directo son la inversión en nuevos modelos de bujías y aceite. Son productos recientes en el mercado y, por ello, no existen circulares técnicas-económicas con las que estudiar con certeza las mejoras económicas/funcionamiento que suponen.

Se puede asumir un riesgo en el retorno de la inversión de los nuevos productos, pero hay que garantizar siempre el correcto funcionamiento del motor. Debido a esto, todos los elementos que se consideran potenciales en obtener una mejora están homologados por la marca MWM.

La inversión se justifica por considerar que una instalación de estas características, un pequeño incremento del rendimiento puede suponer un ahorro importante.

La esencia de esta inversión es la búsqueda de la mejora del rendimiento de los motores de gas de la cogeneración.

En este apartado se encuentran así, los presupuestos de todas las implementaciones y trabajos que se han requerido para realizar el proyecto. También se incluye el estudio del ahorro final que generan los nuevos elementos introducidos en el motor.

8.1 Estudio económico

Para la solicitud de la inversión I+D se ha realizado un estudio económico, donde se presenta el presupuesto de todo el material y trabajos necesarios para llevar a cabo la implementación tecnológica.

Los costes de la instrumentación instalada en el proyecto se exponen de forma desglosada en la siguiente tabla 45.

INSTRUMENTACIÓN	
Descripción de producto	Precio
Torsiómetro TorqueTrak Revolution	8.747 €
Caudalímetros Endress+Hauser (85 °C) x unidades	4.774 €
Caudalímetros Endress+Hauser (50 °C)	1624 €
Caudalímetro Endres+Hauser Vortex	3.965 €
Caudalímetro aceite Lowflow	2.095 €
Convertor de gas	2.475 €
Analizador industrial de gases	3.995 €
TOTAL INSTRUMENTACIÓN:	27.675 €

Tabla 45. Presupuesto de instrumentación (Fuente: Propia)

A continuación, los precios de los nuevos productos homologados por MWM que se han probado a lo largo del proyecto. Las Bujías y el refrigerante son del mismo fabricante que el motor. Cabe remarcar que la diferencia de precio de las bujías anteriores con estas es pequeña, por otra parte, el precio de las bujías tiende a subir.

MATERIALES Y RECAMBIOS		
Descripción del material	Cantidad	Precio total
Bujías 2n generación	16 unidades	8.881 €
Refrigerante alto rendimiento	1.000 Litros	1.850 €
Aceite Lubricante Petronas GEO NG	3.000 Litros	6.150 €
TOTAL MATERIALES Y RECAMBIOS:		16.881 €

Tabla 46. Presupuesto material y recambios homologados (Fuente: Propia)

Los 1000L de refrigerante se subministran en un IBC (intermediate bulk container). Conociendo que la capacidad del circuito es de 750L, con este contenedor se asegura un margen por si hubiera alguna pequeña fuga.

Para la instalación de los distintos elementos de instrumentación ha sido necesario de la participación de técnicos especializados en soldadura, mecánica e instrumentación. En la tabla 47 se muestra el presupuesto que se solicitó para realizar cada tarea de ámbito mecánico.

TRABAJO MECÁNICOS:			
Descripción del trabajo mecánico	Horas	Coste hora	Total trabajo
Instalación de los caudalímetros	33 horas	23,10 €/h	762,3 €
Instalación Torsiómetro + Adhesivo	8 horas	23,10 €/h	240,8 €
Instalación sondas temp. y presión	5 horas	23,10 €/h	115,5 €
Instalación tubo de pitot	6 horas	23,10 €/h	138,6 €
Instalación Bujías 2n generación	1 horas	23,10 €/h	23,10 €
Trabajos mecánicos línea aceite	8 horas	23,10	184 €
TOTAL TRABAJOS MECÁNICOS			1.648,3 €

Tabla 47. Presupuesto trabajos mecánicos (Fuente: Propia)

De la misma forma también se desglosan los trabajos eléctricos para cada una de las tareas. En estos trabajos se ha necesitado la colaboración de distintos perfiles de profesionales eléctricos: electricistas generalistas, instrumentistas, técnicos de autómatas, etc.

TRABAJO ELÉCTRICOS:			
Descripción del trabajo eléctrico	Horas	Coste hora	Total trabajo
Instalación eléctrica conversor de gas	8 horas	88 €/h	704 €
Instalación eléctrica para caudalímetros	4 horas	22 €/h	88 €
Instalación eléctrica torsiómetro	2,5 horas	22 €/h	55 €
Instalación eléctrica transmisor pitot	1,5 horas	22 €/h	33 €
Instalar módulo entradas analógicas PLC (incluye la tarjeta)	0,5 horas	22 €/h	161 €
Calibración de sondas de temperatura	3 horas	22 €/h	66 €
TOTAL TRABAJOS ELÉCTRICOS			1.107 €

Tabla 48. Presupuesto trabajos eléctricos (Fuente: Propia)

Para los trabajos de programación se acordó el presupuesto que se muestra en la siguiente tabla número 49.

TRABAJO DE PROGRAMACIÓN:			
Gestión de las señales 4...20 mA y realizar cálculos.	8 h	30 €/h	240 €
Dibujar SCADA y presentación de las señales por pantalla.	10 h	30 €/h	300 €

Tabla 49. Presupuesto trabajos de programación (Fuente: Propia)

En último lugar, se ha requerido de la colaboración de técnicos especializados para el ajuste del motor.

SAT		
Ajustes motor para nuevas bujías	Jornada de 10 horas con dietas	820,5 €
Ajustes de emisiones y rendimiento	Jornada de 8 horas con dietas	1.778 €
TOTAL TRABAJOS SAT		2.598,5€

Tabla 50. Presupuesto servicio de atención técnica (Fuente: Propia)

8.2 Estudio del ahorro:

El ahorro de estas mejoras se compone por un aumento en el rendimiento eléctrico y una mejora en el aprovechamiento del calor útil.

En primer lugar, tras realizar el mantenimiento del motor se obtuvo un rendimiento eléctrico del 41,17%. Tras instalar las bujías de segunda generación y ajustar el motor para obtener la mayor eficiencia de estas, se elevó el rendimiento del grupo hasta el 41,71%.

Este incremento del rendimiento supone un ahorro de 650,28 €/mes.

En segundo lugar, se mejora la transferencia térmica del circuito de refrigeración del motor, donde se consigue un ahorro de 977,38 €/mes.

En último lugar, también se obtiene un ahorro por parte del aceite lubricante. La reducción del consumo de aceite es debido a los aros rascadores y no se incluye ese ahorro a este proyecto. El ahorro que se incluye es la diferencia de precio que existe entre los dos lubricantes.

El precio del aceite utilizado habitualmente (SHELL MYSELLA S5 N40) es de 2,26 €/l, en cambio el coste para el aceite PETRONAS GEO NG 40 es de 2,05€/l.

Calculando una media de consumo de 130 litros al mes se genera un ahorro de 27,3 €/mes.

RESULTADOS DE LA INVERSIÓN	
Importe total aprobado	50.449,8 €
Ahorro anual	19.859,52 €
ROI	2,54

Tabla 51. Resultados de la inversión I+D (Fuente: Propia)

En la tabla 51 se muestra los resultados de la inversión donde se ha calculado el ROI (Return On Investment), el retorno de la inversión. Para recuperar la inversión inicial harán falta 2,54 años.

Capítulo 9. Monitorización y estudios de las energías del grupo.

9.1 Curvas de rendimiento.

Este capítulo da lugar tras instalar toda la monitorización y el registro de todos los parámetros del motor de forma instantánea.

Se empieza el estudio mediante la creación y el estudio de las curvas de rendimiento. La metodología para trazar las curvas se compone primeramente por la creación de una tabla de rendimientos. Se registra para cada porcentaje de carga la energía media que generada en kW. Para el mismo régimen de carga se hacen las lecturas de consumo de gas mediante los conversores CORUS.

CÁLCULO DEL RENDIMIENTO ELÉCTRICO						
FECHA: 06/05/2020			LUGAR: LA CLOSA, GUISSONA			
Porcentaje de carga	Energía Generada kW	Gas Consumido Nm3	Gas Consumido kW	Rendimiento		
40%	1466	388	4095,34	35,80%	Densidad	0,595
45%	1650	422,3	4457,38	37,02%	%CO2	0,197
50%	1850	454,5	4797,25	38,56%	Pref	1,0132
55%	2009	492,6	5199,39	38,64%	PCS	11,3
60%	2196	534	5636,37	38,96%	PCI	10,555
65%	2347	563,4	5946,69	39,47%		
70%	2580	608,3	6420,61	40,18%		
75%	2775	648,2	6841,75	40,56%		
80%	2957	687,7	7258,67	40,74%		
85%	3149	727,2	7675,60	41,03%		
90%	3347	768	8106,24	41,29%		
95%	3464	785,5	8290,95	41,78%		

Tabla 52. Cálculo del rendimiento eléctrico para diversos rangos de potencia (Fuente: Propia)

Graficando la anterior tabla se presenta la siguiente curva de rendimiento como la figura 71. Aunque era de esperar, a mayores niveles de potencia la eficiencia eléctrica se eleva.

Se obtienen pésimos rendimientos para porcentaje de carga de entre el 40-60%. Cabe remarcar que no se trabaja en valores de carga inferiores al 60%.

Nótese la inclinación de la curva entre el 40% y 50% de carga, como en esos valores se puede aumentar o disminuir hasta un 3% el rendimiento.

Tras superar el régimen de carga del 70% la curva es menos inclinada y, por ende, el rendimiento incrementa en menos porcentaje.

En el final del recorrido la curva vuelve a inclinarse un tanto más y, operando al 95% de potencia se consigue obtener un rendimiento final muy satisfactorio.

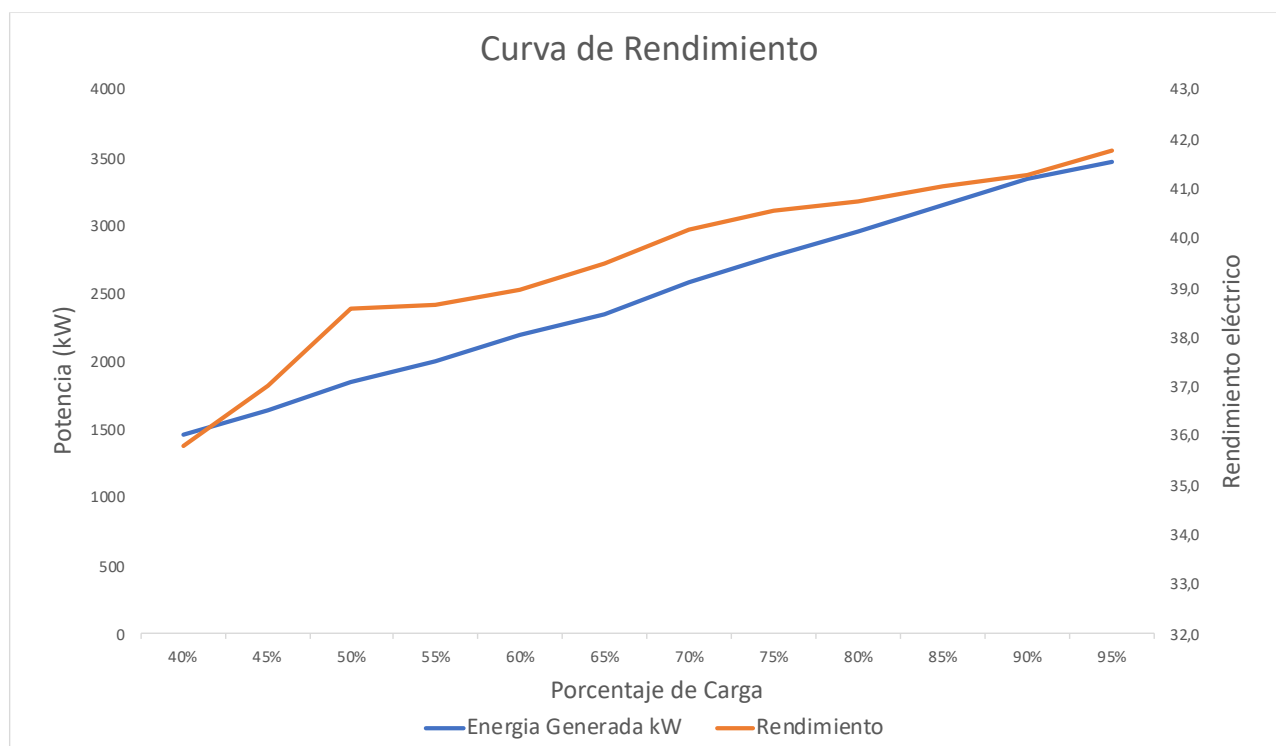


Figura 71. Curva de rendimiento (Fuente: Propia)

9.1.1 Estudio del ahorro energético mediante ratios de consumo

A modo de poner en práctica la valiosa información que aportan las curvas de rendimiento, se realiza un estudio para observar el ahorro económico que significa trabajar a una carga u otra.

El estudio se realiza entre trabajar al 80% de potencia (punto donde suelen trabajar los grupos) y al 95%.

Los valores de energía con los que se trabaja pertenecen al mes de mayo del 2020.

Régimen de carga del 95%:

La energía media que genera el grupo trabajando al 95% es de: **3.514 kW**

La energía en forma de gas necesario para trabajar al 95% es de: **8.450,82 kW**

Ratio de consumo= **2,405 kWgas/kWelec.**

Régimen de carga del 80%:

La energía media que genera el grupo trabajando al 80% es de: **2.950 kW**

La energía en forma de gas necesario para trabajar al 80% es de: **7223,439 kW**

Ratio de consumo= **2,449 kWgas/kWelec.**

El ratio de ahorro es de un valor de **0,044 kWgas/kWelec.**

Con la cifra de kilovatios producidos por el motor en el mes de mayo y el precio del gas, se consigue calcular el posible ahorro que se obtendría operando al 95%.

Cálculo del ahorro final:

Precio medio del gas: **0,017 €/kW**

Energía producida en el mes de mayo de 2020: **789.650 kWh**

Ahorro económico mensual para el motor G5:

$789.650 \text{ kWh} \times 0,044 \text{ kWgas/kWelec.} \times 0,017 \text{ €/kW} = \mathbf{590,6 \text{ €}}$

Anualmente supondría un ahorro de: **7.087 €**

9.2 Balances de energía

En este apartado se presenta el balance de las energías del motor de forma real y para diversos porcentajes de carga.

Es el resultado obtenido mediante la implementación tecnológica que se muestra en el capítulo 3. Para registrar los resultados de generación eléctrica se utilizan los contadores ya existentes.

La metodología para este estudio consiste en monitorizar cada energía durante un período de tiempo en una determinada carga.

Una vez se estabiliza el motor para el porcentaje de carga determinado, se registran todas las energías durante un periodo razonable de tiempo. De todos los valores obtenidos para ese periodo se realiza una media.

Las condiciones ambientales pueden influir notablemente en los resultados obtenidos.

Este balance pretende mostrar la energía en forma de calor que es capaz de generar el motor y, la energía que absorbe el circuito de calefacción. El balance es de gran ayuda para poder gestionar la planta energéticamente, pues se puede ser consciente de la energía térmica real que se va a generar.

BALANCE ENERGÉTICO REAL	Porcentajes de carga					
	50%	60%	70%	80%	90%	95%
Energías térmicas generadas por motor (kW)						
E. Gases de combustión	1328	1498	1669	1840	2011	2096
E. Agua alta temperatura	660	734	935	1098	1256	1314
E. Aceite Lubricante	385	404	423	451	455	465
E. Baja temperatura	120	164	194	220	286	314
<i>E. Térmica total producida</i>	<i>2493</i>	<i>2800</i>	<i>3221</i>	<i>3609</i>	<i>4008</i>	<i>4189</i>
Energía absorbida circuito de calefacción (kW)						
E. absorbida de agua alta t.	590	710	898	950	1225	1297
E. absorbida de aceite	239	278	311	316	337	348
<i>E. total absorbida</i>	<i>830</i>	<i>1020</i>	<i>1209</i>	<i>1270</i>	<i>1572</i>	<i>1645</i>
Generación eléctrica (kW)						
Energía eléctrica producida	1850	2196	2580	2957	3347	3464
Consumos energéticos (kW)						
Energía consumida en forma de gas	4797	5636	6420	7258	8106	8290

Tabla 53. Balance energético real del motor (Fuente: Propia)

Un fenómeno por remarcar es la constante generación de energía térmica por parte del aceite y el agua de baja temperatura. A partir del 50% de carga, la generación de estas energías se mantiene en valores muy parecidos con un leve ascenso. En la gráfica de la figura 72 se muestra tal fenómeno.

Se entiende que el incremento de energía al aumentar la potencia del motor se genera en las cámaras de combustión y, que es el circuito de alta temperatura el responsable de enfriar las camisas.

Se esperaba que el circuito de baja temperatura subiera de una forma más progresiva, porque al aumentar la carga el motor aspira más aire y, por tanto, los intercoolers deben enfriar más cantidad de aire.

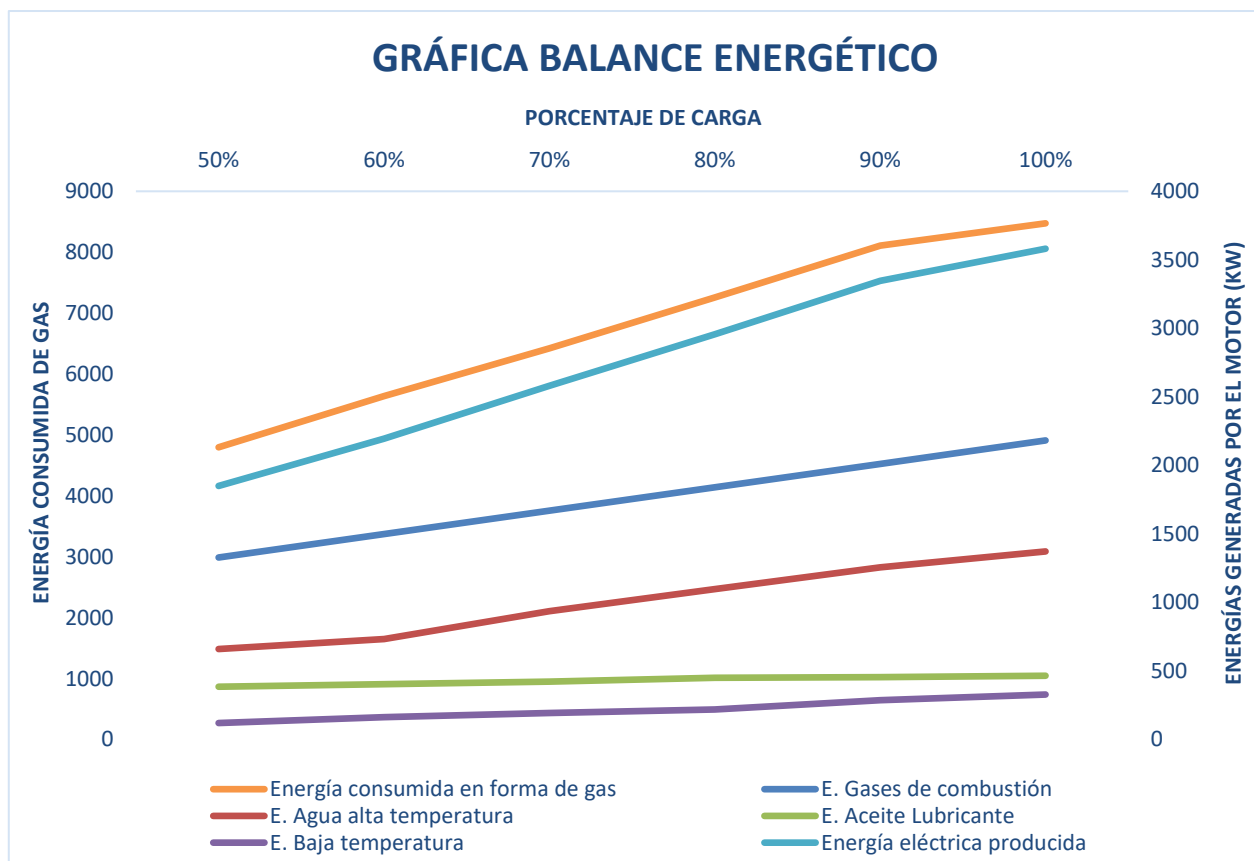


Figura 72. Gráfica Balance energético (Fuente: Propia)

Por último, se muestra en la tabla 54 los rendimientos parciales y totales de generación. No se debe confundir la generación térmica del motor con el aprovechamiento final de estas energías por parte de la planta.

Para realizar esta tabla se han cogido los valores de la tabla 53 y se han calculado los rendimientos parciales y totales.

En el Capítulo 2, apartado “Especificaciones técnicas del motor TCG 2032 V16 MWM” se encuentra el balance energético de referencia. El balance de referencia no incluye la eficiencia térmica de la energía generada por agua de baja temperatura (intercoolers). Esto se entiende debido a que muchas instalaciones no aprovechan tal energía y la disipan a través de torres de refrigeración. Al encontrarse a una temperatura baja no sirve para procesos industriales de producción. Por otra parte, se obtiene un rendimiento térmico más alto al de referencia.

Como era de esperar los gases de combustión suponen el mayor porcentaje de generación de energía térmica. Se puede apreciar como el rendimiento de generación disminuye levemente a medida que se incrementa la carga. La temperatura de los humos desciende aumentando la carga de trabajo, generando el pequeño descenso en el rendimiento.

De forma contraria el rendimiento de generación de agua de alta temperatura aumenta subiendo la potencia del motor.

El rendimiento térmico total parece mantener un equilibrio y se mantiene bastante constante.

La eficiencia global asciende en incrementar el porcentaje de carga.

RENDIMIENTOS DE GENERACIÓN	Porcentajes de carga					
	50%	60%	70%	80%	90%	95%
PORCENTAJES PARCIALES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA						
E. Gases de combustión	27,68%	26,58%	26,00%	25,35%	24,81%	25,28%
E. Agua alta temperatura	13,76%	13,02%	14,56%	15,13%	15,49%	15,85%
E. Aceite Lubricante	8,03%	7,17%	6,59%	6,21%	5,61%	5,61%
E. Baja temperatura	2,50%	2,91%	3,02%	3,03%	3,53%	3,79%
RESULTADOS DEL EJERCICIO						
EFICIENCIA ELÉCTRICA	38,57%	38,96%	40,19%	40,74%	41,29%	41,79%
EFICIENCIA TÉRMICA	51,97%	49,68%	50,17%	49,72%	49,44%	50,53%
EFICIENCIA GLOBAL	90,54%	88,64%	90,36%	90,47%	90,74%	92,32%

Tabla 54. Rendimientos de generación (Fuente: Propia)

9.3 Pantalla SCADA para el monitoreo

Como se ha ido mencionando a lo largo del trabajo, todas las señales de la implementación tecnológica se han monitorizado y se muestran a través de una pantalla SCADA.

Se ha decidido crear una pantalla de ámbito energético con la intención de tener una herramienta para vigilar y monitorear los diferentes rendimientos del grupo.

En la figura 73 se encuentra la pantalla mencionada, donde se pueden apreciar todas las energías de forma instantánea que entrega el motor y el gas que se consume. Para cada energía se muestra su valor en kilovatios y el rendimiento que supone.

En referencia a la potencia consumida de gas, hay que vigilar el PCI introducido en el sistema. Se recuerda que el PCI cambia en función de la calidad del gas. Es el único parámetro que se debe actualizar manualmente para tener el consumo real de gas.

9.3.1 KPI'S Energéticos

Los KPI'S (*Key performance indicator*) son indicadores clave de rendimiento. Es una forma de medir el rendimiento de la maquina fijando previamente un objetivo. Mediante esta clave se puede comprobar el grado de cumplimiento de los objetivos.

En la parte superior izquierda de la pantalla SCADA se han programado dos indicadores de eficiencia (térmica y eléctrica) y dos en relación con el rendimiento del aceite.

Para valorar el grado de cumplimiento se ha introducido un valor óptimo para cada indicador y el valor que se obtiene.

Los valores fijados como óptimos son los obtenidos en las pruebas de rendimiento. Se considera que después del overhaul y todas las implementaciones, el motor está en su nivel más alto de eficacia y, a partir de aquí, irá decreciendo.

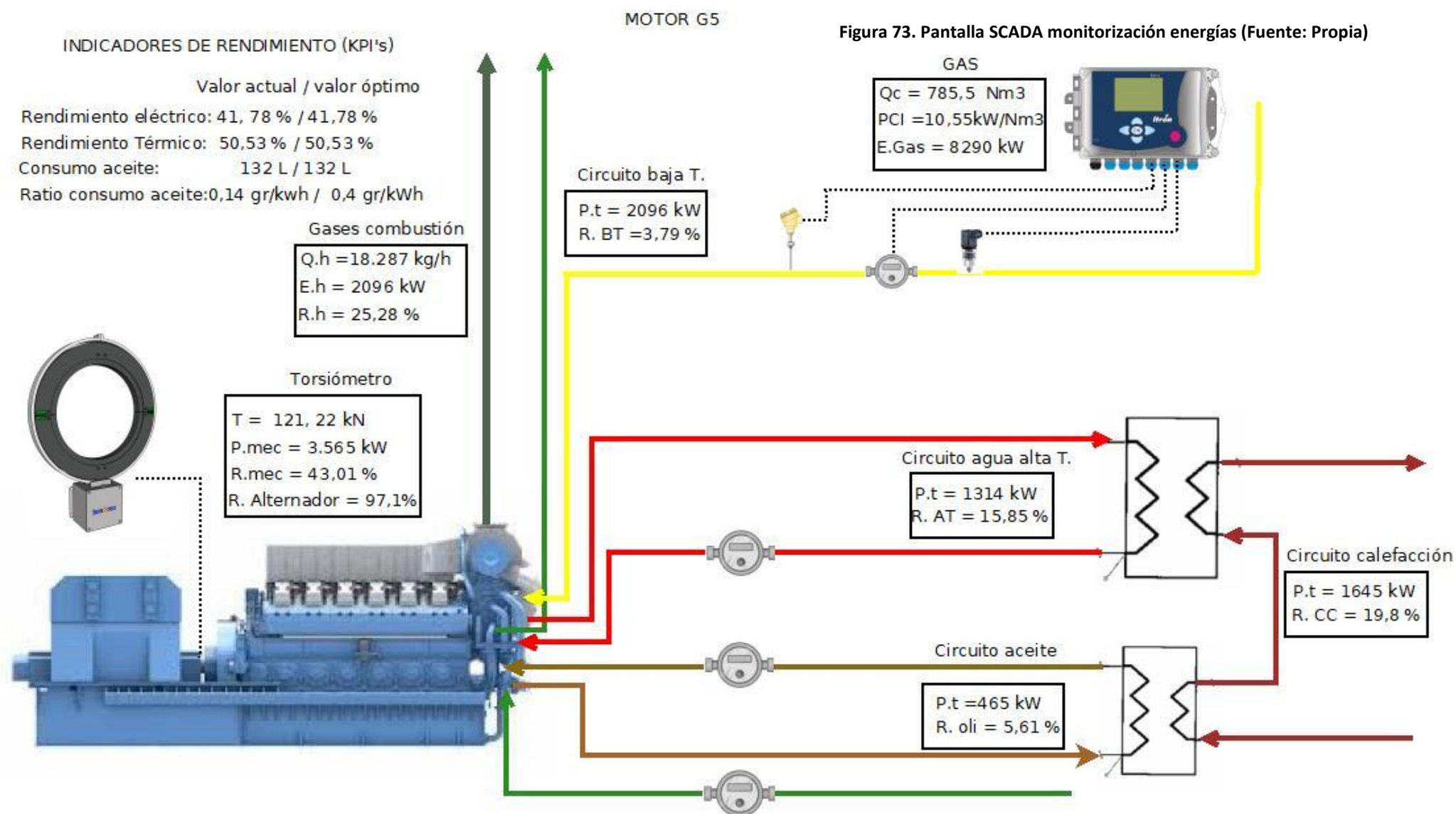


Figura 73. Pantalla SCADA monitorización energías (Fuente: Propia)

9.4 Resultados de la torsión y magnitudes efectivas

Los resultados que se muestran en este estudio son las magnitudes efectivas, extraídas del motor mediante el torsiómetro y el conteo de gas por medio del conversor electrónico.

Se ha creado un ratio entre el consumo de gas y la potencia efectiva que desarrolla el eje. Dicho ratio se ha graficado junto con la torsión del eje, el resultado se muestra en la figura 74.

La torsión asciende de forma bastante lineal, puesto que es un motor de velocidad constante a 1000 rpm. En motores que la velocidad de giro varia, la torsión se comportará de diferente manera.

En relación al ratio entre consumo y energía efectiva, desciende a medida que el porcentaje de carga sube. Esto vuelve a demostrar que a mayores niveles de potencia la eficiencia del motor se eleva.

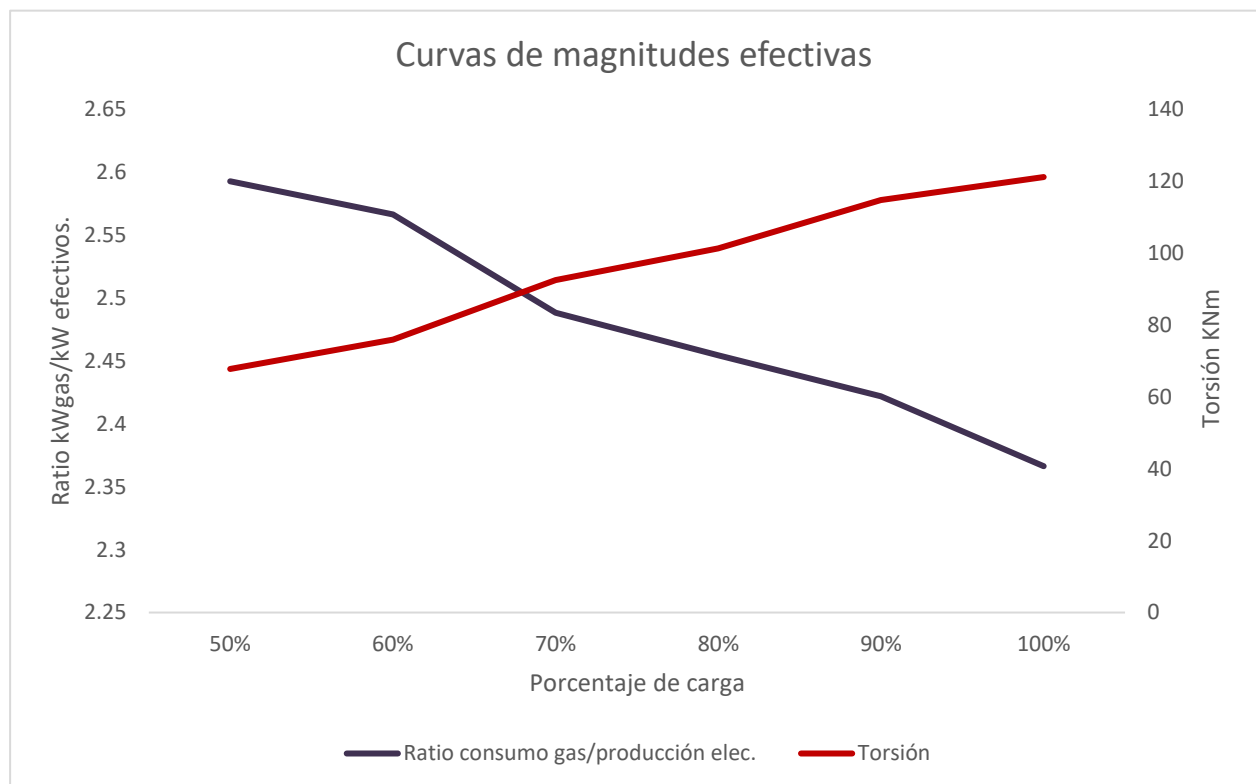


Figura 74. Curvas de magnitudes efectivas (Fuente: Propia)

Capítulo 10. Conclusiones

En primer lugar, reflejar la importancia de la monitorización y el análisis de los datos, que ha constituido la base fundamental del proyecto para realizar todos los estudios y ensayos expuestos.

Se ha conseguido el objetivo principal del trabajo, puesto que mediante la instalación de las bujías de segunda generación se ha conseguido aumentar gratamente el rendimiento eléctrico. También se ha logrado incrementar la eficiencia térmica mediante el nuevo refrigerante.

El rendimiento eléctrico de este motor en su compra era de 42,2% y, aunque no se ha logrado volver a valor inicial, se considera como muy bueno el 41,71% obtenido después de instalar las bujías y ajustar el motor.

En referencia a la mejora de la corrosión del motor a través del refrigerante, no se pueden aportar unas conclusiones, puesto que son pruebas que requieren de un periodo de tiempo más amplio para extraer resultados verídicos.

Todos los análisis de emisiones y ensayos que se han realizado mediante el analizador de gases aportan una investigación excepcional. Ahora se tienen las bases de como se comportan los gases y como reducir sus emisiones. Próximamente, se podrá actuar con firmeza ante nuevos límites de emisiones más estrictos.

Por otro lado, se relaciona la drástica bajada del consumo de aceite con el montaje de los anillos rascadores instalados en el overhaul. Hasta la fecha, el consumo con el aceite de PETRONAS parece comportarse dentro de los parámetros correctos. Para valorar una mejora respecto al aceite de SHELL se requiere de más tiempo de observación. A partir de aquí, se irá comprobando que tanto sus propiedades como el consumo se mantengan en niveles correctos.

Tras toda la implementación tecnológica y los estudios realizados, se ha podido concienciar de la importancia de la búsqueda de la eficiencia energética. Tal y como se ha demostrado en todos los estudios económicos del trabajo, un pequeño incremento del rendimiento supone un ahorro económico de gran valor.

10.1 Líneas de trabajo

En este apartado se documentan las líneas de trabajo en las cuales se continuarán trabajando y, los futuros trabajos para acabar de cumplimentar la monitorización energética.

Las siguientes tareas son a modo de seguimiento y control:

- Seguimiento y control de las propiedades del refrigerante. Se comprobará con una periodicidad quincenal los siguientes parámetros: pH, dureza, conductividad y cantidad de inhibidores de corrosión.
- Realizar el seguimiento del consumo y propiedades del aceite PETRONAS y, con ello, realizar informes sobre el estado y el rendimiento del lubricante.
- Recoger una muestra de aceite mensualmente y enviarla al laboratorio POLARIS.
- Mantener el contacto y la colaboración activa con el equipo de PETRONAS LUBRICANTS y LUBRITEC para valorar conjuntamente el progreso del aceite en el motor.
- Seguimiento del funcionamiento de las bujías de segunda generación. Al ser un nuevo producto no se tiene la certeza de la durabilidad de este buen funcionamiento que se tienen hasta el momento. Se tendrán que vigilar las emisiones y la eficiencia eléctrica periódicamente.
- Comprobación del cumplimiento de los objetivos fijados en los KPI'S.

La monitorización realizada permite realizar otros estudios y controles de sistemas que no se han realizado para este proyecto. Algunos de ellos se exponen a continuación.

- Monitorización de la eficiencia de enfriamiento de los intercoolers.
- Monitorización de la eficiencia de los intercambiadores de calor.

Bibliografía

- [1] Garcia Garrido, S., Fraile Chico, D. & Fraile Martín, J. (2010). *Motores alternativos de gas: motores térmicos para generación eléctrica*. Madrid: Gráficas Arias Montano.
- [2] Deutz Iberia Guissona. (2002). Deutz power systems: documentación grupo.
- [3] Vicente Dolz. *Transmisión de calor en motores alternativos: Aplicación al aprovechamiento energético de los gases de escape*. Barcelona: Editorial Reverté, 2011. 978-84-291-4715-5.
- [4] Endress+Hauser. (2018). *Manual de instrucciones abreviado: Caudalímetro Proline 200*.
- [5] BINSFELD ENGINEERONG INC. (2019). *Torque Trak Revolution Torque and Power Monitoring system: User's Guide*. Maple City (USA). (8660019J)
- [6] Carterpillar Energy Solutions GmbH Servicedokumentation. (2019). *Circular técnica: Especificaciones para líquidos refrigerantes*. Alemania.
- [7] Carterpillar Energy Solutions GmbH Servicedokumentation. (2019). *MWM Premium protect: High performance corrosion protection ready-mix for MWM gas engines*. Alemania.
- [8] Carterpillar Energy Solutions GmbH Servicedokumentation. (2019). *Circular técnica: Especificaciones para aceite lubricante*. Alemania.
- [9] Karl Hoffman. Revised by Emilio Estany-Catalán. *Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas*. Barcelona. Editor: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt
- [10] Endress+Hauser. *Operating instructions: Pitot tubes for differential pressure flow measurement*.

Webgrafía

- [11] HBM Company. *FUNDAMENTOS SOBRE LA MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN*. [Consulta: 25 de febrero 2020]. Disponible en: <https://www.hbm.com/es/6896/fundamentos-sobre-medicion-de-deformacion/>.
- [12] BINSFELD ENGINEERING INC. *STRAIN GAGE INSTALLATION & FAQ'S*. O. [Consulta: 7 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://binsfeld.com/support/torquetrak-support/torquetrak-support-strain-gage-installation/>.
- [13] VAF INSTRUMENTS. *TECHINICAL MANUAL: INSTRUCCIONS FOR INSTALLATION, OPERATION AND MAINTENANCE*. [Consulta: 13 de noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.vaf.nl/media/1518/tib-145-gb-0320-proflow-series-i-vanemeter.pdf?type=Manual>
- [14] A DIVISION OF ALABAMA SPECIALLY PRODUCTS, INC. *METAL SAMPLE CORROSION MONITORING SYSTEMS: CUPONES DE CORROSIÓN Y ANÁLISIS DE PERDIDA DE PESO*. [Consulta: 28 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://idoc.pub/documents/cupones-de-corrosion-d2nv0807w94k>.
- [15] CONTATEC. *CAUDALÍMETRO O CONTADORES ELECTROMÁGNÉTICOS*. [Consulta: 24 de AGOSTO de 2019]. Disponible en: <https://www.contatec.es/caudalimetros/electromagneticos/>.
- [16] ENDRESS+HAUSER. *PROLINE PROMAG P500 CAUDALÍMETRO ELECTROMÁGNÉTICO: CAUDALÍMETRO DE ALTA TEMPERATURA PARA APLICACIONES DE PROCESO COMO VERSIÓN REMOTA CON HASTA 4E/S*. [Consulta: 17 de noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-caudal/caudalimetro-electromagnetico-temperaturas-promag-p500>.
- [17] ENAGÁS. *CALIDAD DEL GAS POR MUNICIPIO*. [Consulta: 7 de mayo de 2020]. Disponible en: [https://www.enagas.es/enagas/es/Gestion Tecnica Sistema/CalidadGas/CalidadGasMunicipio](https://www.enagas.es/enagas/es/Gestion_Tecnica_Sistema/CalidadGas/CalidadGasMunicipio).
- [18] JUAN MENDOZA. *ENSAYO DE TORSIÓN EN METALES*. [Consulta: 10 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos59/torsion-metales/torsion-metales2.shtml>.

- [19] MORFOCODING & ENGINEERING. *STRAIN GAUGE BASED WEIGHT SENSOR*. [Consulta: 15 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://morf.lv/strain-gauge-based-weight-sensor-load-cell>.
- [20] KAWA: *BUJÍA CHAMPION RG4PHP*. Consulta: 20 de abril de 2020]. Disponible en: <http://www.kawa7080oldvintage.fr/es/2333-bujia-champion-rg4php.html>.
- [21] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. *REAL DECRETO 1042/2017, DE 22 DE DICIEMBRE, SOBRE LA LIMITACIÓN DE LAS EMISIONES A LA ATMÓSFERA DE DETERMINADOS AGENTES CONTAMINANTES PROCEDENTES DE LAS INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN MEDIANAS Y POR EL QUE SE ACTUALIZA EL ANEXO IV DE LA LEY 34/2007, DE 15 DE NOVIEMBRE, DE CALIDAD DEL AIRE Y PROTECCIÓN DE LA ATMÓSFERA*. Publicado: 23 de diciembre de 2017. BOE-A-2017-15368. [Consulta: 27 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-15368>.